

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba

Fakulta bezpečnostního inženýrství

Katedra požární ochrany

**Některé aspekty detekce požáru z pohledu
integrace požárně-bezpečnostních zařízení**

Disertační práce

pro získání akademického titulu „doktor“, ve zkratce „Ph.D.“

Autor:	Ing. Petr Bítala
Školitel:	prof. Dr. Ing. Aleš Dudáček
Studijní program:	Požární ochrana a průmyslová bezpečnost
Studijní obor:	Požární ochrana a bezpečnost průmyslu

Ostrava, 20. května 2012

Abstrakt

BITALA, P. *Některé aspekty detekce požáru z pohledu integrace požárně-bezpečnostních zařízení*. Ostrava, 2012. 151 s. Disertační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Vedoucí práce prof. Dr. Ing. Aleš Dudáček.

Vzájemné interakce plamene a plynných hasicích látek reprezentují velmi komplexní systém úzce provázaných fenoménů dynamiky tekutin, sdílení tepla a chemie hoření. Pochopení jevů uplatňujících se při těchto procesech vytváří nezbytný předpoklad pro výběr vhodných parametrů požáru a návrh algoritmu jejich vyhodnocování, který by umožnil nejen detekci vzniklého požáru, ale také monitorování jeho likvidace.

Cílem disertační práce bylo ověřit možnost využití metod videodetekce plamene pro monitorování procesu hašení požáru za použití plynných hasicích látek. V teoretické části práce je proveden rozbor současných poznatků o plameni a zhodnocen aktuální stav v oblasti videodetekce požáru. Pro naplnění cíle disertační práce byla použita metoda laboratorního experimentu. V rámci laboratorního měření byla s využitím navržené a realizované experimentální sestavy prováděna měření intenzity vyzařování plamene vybraného plynného a kapalného paliva. Plamen obou typů paliv byl monitorován ve dvou různých oblastech vlnových délek spektra elektromagnetického záření při různých koncentracích plynných hasicích látek pod hodnotou minimální hasicí koncentrace v okolní atmosféře plamene. Uvedená měření byla rovněž doplněna o fotografické snímkování plamene. Výsledky z měření i informace získané snímkováním plamene byly teoreticky interpretovány a porovnány s dílčími poznatky studií jiných autorů. V závěru práce jsou poznatky experimentálního měření konfrontovány se současným stavem v oblasti metod videodetekce plamene. Tato disertační práce je příspěvkem nejen v oblasti testování současných metod videodetekce požárů, ale také v oblasti validaci nástrojů matematického modelování kombinovaných modelů chemické kinetiky a fluidní dynamiky procesů spalování.

Klíčová slova: frekvence oscilace plamene; hořák; minimální hasicí koncentrace; plamen; požár; videodetekce plamene

Abstract

BITALA, P. *Some Aspects of Fire Detection from the Point of View of Integration of Fire-Safety Equipment*. Ostrava, 2012. 151 p. Ph.D. thesis. VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Safety Engineering. Thesis supervisor prof. Dr. Ing. Aleš Dudáček.

Interactions between a flame and gaseous extinguishing agents represent a very complex system of closely interconnected processes of fluid dynamics, heat transfer and combustion chemistry. The understanding of phenomena participating in these processes creates a necessary precondition for the selection of suitable parameters of a fire and for the design of an algorithm for their assessment, which would enable not only the detection of the fire, but also the monitoring of its suppression.

The aim of the Ph.D. thesis was to verify a possibility of employing video flame detection methods to monitor the process of fire suppression using gaseous extinguishing agents. In the theoretical part of the thesis, the analysis of current knowledge of the flame is made and the present state in the area of video fire detection is assessed. In order to accomplish the aim of the Ph.D. thesis, a laboratory experiment method was used. In the framework of laboratory measurement, measurement of the intensity of radiation of the flame of a chosen gaseous and a liquid fuel with a designed and built experimental setup was carried out. The flame of both the fuel types was monitored in two different wavelength regions of the electromagnetic radiation spectrum at various concentrations of gaseous extinguishing agents below the value of minimum extinguishing concentration in the surrounding atmosphere of the flame. The mentioned measurement was supplemented by photographic imaging of the flame. Measurement results and also information acquired by flame imaging were theoretically interpreted and compared with partial findings from studies of other authors. In the conclusion of the thesis, findings of experimental measurement are confronted with the present state in the area of video flame detection methods. This Ph.D. thesis contributes to both the testing of present video fire detection methods and the validation of tools of mathematical modelling of combined models of chemical kinetics and fluid dynamics of combustion processes.

Key words: flame oscillation frequency, burner, minimum extinguishing concentration; flame; fire; video flame detection

Čestné prohlášení a souhlas se zveřejněním

Prohlašuji, že jsem celou disertační práci vypracoval samostatně podle pokynů školitele s použitím literatury uvedené v soupisu bibliografických citací a v souladu se Studijním řádem.

V souladu s § 47b zákona 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním celé disertační práce prostřednictvím informačního systému VŠB - TU Ostrava umožňujícího dálkový přístup.

Jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se vztahuje zákon 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že VŠB - TU Ostrava nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu VŠB - TU Ostrava (§ 35 odst. (3) zákona 121/2000 Sb. v platném znění).

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti VŠB - TU Ostrava; v tomto případě má VŠB - TU Ostrava právo požadovat ode mne úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše (§ 60 odst. (3) zákona 121/2000 Sb. v platném znění).

V Ostravě 20. 5. 2012

Ing. Petr Bitala

Předmluva (motivace)

Experimentálně zaměřené studie fyzikálních a chemických jevů uplatňujících se při procesech hoření a hašení přinášejí zásadní poznatky nutné pro formulování kritérií a volbu vhodných metod detekce požáru. Předložená disertační práce představuje významný příspěvek k několika projektům základního i aplikovaného výzkumu. Obecným předmětem řešení níže uvedených projektů je zkoumání environmentálních aspektů antropogenních aktivit v úzké souvislosti s tematikou požárně bezpečnostního inženýrství.

Motivací a výzvou pro zpracování této práce bylo nejen naplnění cílů disertační práce a dílčích výzkumných úkolů, ale také možnost získání nových znalostí, vědomostí a praktických poznatků v kontextu zvoleného tématu.

Poděkování

Své poděkování bych rád vyjádřil v první řadě svému kolegovi a kamarádovi Václavu Nevrlému za veškerou jeho pomoc, povzbuzování i podporu (nejen pracovní). Mému školiteli Aleši Dudáčkovi děkuji za jeho vedení, vstřícnost a čas, který mi věnoval v nekonečných diskuzích o předmětu práce. Za to, že mi ukázali cestu a pomohli se mi po ní vydat, vděčím Michalu Střížíkovi a Zdeňku Zelingerovi. Jejich vliv změnil způsob, kterým se na věci dívám, moc jsem si cenil a cením jejich vstřícnosti, ochoty i času, který mi přitom věnovali. Tituly a akademické hodnosti zmíněných pánů neuvádím záměrně, jelikož toto poděkování není pouze formálním aktem.

Obrovské poděkování za toleranci, zázemí, podporu a starost patří mojí ženě Barboře a synům Petrovi a Šimonovi. Svému otci Zdeňkovi děkuji za porozumění a celoživotní podporu. Práci bych rád věnoval dvěma lidem, a to mamince Ivance a kamarádovi Michalu Střížíkovi. Měl jsem vás moc rád.

Tato disertační práce vznikla za významné podpory projektů Interního grantového systému FBI VŠB - TUO v letech 2008 – 2011. V případě zmiňované podpory projektů Interního grantového systému FBI VŠB - TUO byla podpořena projekty “Infračervená diagnostika procesů hoření a hašení” (projekt SGS č. SP/2010148), “Infračervené snímkování plamene pohárkového hořáku” (projekt IGS č. 023/2101/BI0239021), “Infračervená termografie a numerická simulace plamene laboratorního pohárkového hořáku” (projekt IGS č. 023/2101/BI 023 8011) a “Studie amoniaku pomocí PAS a FTIR

spektroskopie fluorovaných látek (freonů)“ (projekt IGS č. 023/2101/BI0239021). Práce byla dále podpořena projekty Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci projektů “Vliv antropogenních aktivit na atmosférické cykly dusíkatých sloučenin, jejich management a legislativa“ (projekt č. OC 186 – akce COST 729), “Laboratoř pokročilých spektroskopických technik v bezpečnostním inženýrství“ (projekt č. 1111/2008/A/a) a projektem Ministerstvem životního prostředí České republiky “Komplexní interakce mezi přírodními ději a průmyslem s ohledem na prevenci závažných havárií a krizové řízení” (projekt č. SPII 1a10 45/07).

Motto:

„...Není běžnějšího omylu než věřit, že když provedeme dlouhé a přesné matematické výpočty, je pak aplikace výsledku na nějaký fakt v přírodě absolutně jistá...“

Alfred North Whitehead

Obsah

Abstrakt.....	1
Abstract.....	2
Předmluva (motivace).....	4
Seznam ilustrací a tabulek	9
Seznam symbolů	14
Seznam zkratk a značek	15
1 Úvod.....	16
1.1 Současný stav problematiky.....	17
2 Cíle a hypotézy	20
3 Videodetekce požáru.....	22
3.1 Techniky identifikace požáru.....	23
3.1.1 Techniky videodetekce kouře.....	24
3.1.2 Techniky videodetekce plamene	25
4 Plamen	28
4.1 Předmísený plamen	28
4.2 Nepředmísený plamen.....	30
4.2.1 Laminární nepředmísený plamen	32
4.2.2 Turbulentní nepředmísený plamen	32
4.3 Vírové struktury a oscilace plamene	34
4.3.1 Režimy oscilace plamene	39
4.3.2 Teorie vzniku sazových částic.....	42
5 Experimentální část.....	45
5.1 Požadavky na experimentální sestavu.....	45
5.2 Experimentální sestava.....	46

5.2.1	Modifikovaný pohárkový hořák	49
5.2.2	Systém přívodu médií	53
5.2.3	Systém snímání signálů	57
5.3	Zpracování dat	60
5.4	Použité látky	61
5.5	Podpurné snímkování plamene	63
5.6	Experimentální měření	63
5.6.1	Měření frekvence oscilace plamene metanu	64
5.6.2	Měření frekvence oscilace plamene <i>n</i> -heptanu	68
5.7	Výsledky měření a diskuse	71
5.7.1	Výsledky měření plamene metanu	71
5.7.2	Výsledky snímkování plamene metanu	88
5.7.3	Výsledky měření plamene <i>n</i> -heptanu	90
6	Závěr	104
	Conclusion	108
7	Soupis bibliografických citací	112
8	Seznam vlastních publikací	119
9	Participace na projektech	123
10	Příloha A: Sumární tabulky výsledků měření	124
11	Příloha B: Sekvence snímků plamene pohárkového hořáku	136
12	Příloha C: Sestava pohárkového hořáku	142
13	Příloha D: Křivky spektrální citlivosti fotodetektorů	143
14	Příloha E: Tabulky průběhů měření	144

Seznam ilustrací a tabulek

<i>Obrázek 1: Blokové schéma systému videodetekce požáru</i>	23
<i>Obrázek 2: Ilustrace dokonalého hoření metanu při stechiometrické koncentraci</i>	29
<i>Obrázek 3: Ilustrace nepředmíseného plamene</i>	31
<i>Obrázek 4: Profily skalárních veličin v reakční zóně nepředmíseného plamene v laminárním (plná linie) a turbulentním (přerušovaná linie) režimu hoření [36]</i>	33
<i>Obrázek 5: Ilustrace turbulentního nepředmíseného plamene</i>	34
<i>Obrázek 6: Závislost frekvence oscilace (frekvence tvorby vírů) plamene na průměru požáru louže dle Pagni [28]</i>	36
<i>Obrázek 7: Závislost frekvence oscilace plamene na průměru požáru (viz [25] a zde uvedené odkazy)</i>	37
<i>Obrázek 8: Frekvence oscilace plamene f a výška plamene A_m jako funkce koncentrace kyslíku X_O v okolním prostředí nepředmíseného plamene metanu [22]</i>	39
<i>Obrázek 9: Schématické znázornění varikózního a sinusového režimu oscilace plamene ..</i>	40
<i>Obrázek 10: Sinusový (A) a varikózní (B) režim oscilace plamene n-heptanu</i>	41
<i>Obrázek 11: Pravděpodobnost varikózního režimu oscilace plamene jako funkce Richardsonova čísla</i>	41
<i>Obrázek 12: Schematické znázornění procesu tvorby sazí (A) a popis dominantních zdrojů tvorby sazí v rozdílných oblastech v plameni (B)</i>	43
<i>Obrázek 13: Teplotní závislost produkce sazí u plamene prostorově homogenní směsi acetylénu, kyslíku a argonu</i>	44
<i>Obrázek 14: Schéma experimentální sestavy</i>	48
<i>Obrázek 15: Způsob realizace přívodu paliva a plyných médií do difuzoru</i>	50
<i>Obrázek 16: Detail konstrukce difuzoru a konstrukce pohárků</i>	51
<i>Obrázek 17: Charakteristika spektrální propustnosti SIMAX skla pro různé tloušťky stěny</i>	52

<i>Obrázek 18: Způsob realizace přívodu kapalného paliva</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 19: Ilustrativní fotografie zapojení a instalace hmotnostních průtokoměrů (A) a systému směšování a přívodu plyných médií do hořáku (B).</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 20: Optické uspořádání fotodetektorů.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 21: Způsob zpracování signálu s využitím frekvenční analýzy signálu.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 22: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ bez přidavku hasicí látky do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm).....</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 23: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ bez přidavku hasicí látky do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm).....</i>	<i>73</i>
<i>Obrázek 24: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ s přidavkem 30 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 25: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ s přidavkem 60 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)</i>	<i>74</i>
<i>Obrázek 26: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ s přidavkem 90 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 27: Trendy závislosti intenzity vyzařování plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ na procentu MEC hasicích látek v obtoku pohárkového hořáku (1200 – 2570 nm)</i>	<i>76</i>
<i>Obrázek 28: Trendy závislosti intenzity vyzařování plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ na procentu MEC hasicích látek v obtoku pohárkového hořáku (350 – 100 nm) ...</i>	<i>76</i>
<i>Obrázek 29: Výsledky simulací teplotního a rychlostního pole plamene metanu pohárkového hořáku bez (A) a s přidavkem CO₂ (B) do obtoku plamene pohárkového dle Katta et. al [23]</i>	<i>77</i>

<i>Obrázek 30: Vliv koncentrace hasicích látek na frekvenci oscilace plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 31: Trend závislosti frekvence oscilace plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$ na koncentraci O_2 v obtoku pohárkového hořáku</i>	<i>80</i>
<i>Obrázek 32: Trend závislosti frekvence oscilace plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$ na koncentraci O_2 v obtoku pohárkového hořáku</i>	<i>80</i>
<i>Obrázek 33: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$ s přidavkem 60 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)</i>	<i>82</i>
<i>Obrázek 34: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$ s přidavkem 60 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)</i>	<i>83</i>
<i>Obrázek 35: Trendy závislosti intenzity vyzařování plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$ na procentu MEC hasicích látek v obtoku pohárkového hořáku (1200 – 2570 nm)</i>	<i>84</i>
<i>Obrázek 36: Trendy závislosti intenzity vyzařování plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$ na procentu MEC hasicích látek v obtoku pohárkového hořáku (350 – 1100 nm)</i>	<i>85</i>
<i>Obrázek 37: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$ bez přidavku hasicí látky do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)</i>	<i>86</i>
<i>Obrázek 38: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$ s přidavkem 30 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)</i>	<i>86</i>
<i>Obrázek 39: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$ s přidavkem 60 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)</i>	<i>87</i>
<i>Obrázek 40: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$ s přidavkem 90 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)</i>	<i>87</i>

<i>Obrázek 41: Sekvence snímků plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasicí koncentrace N_2 v obtoku plamene pohárkového hořáku</i>	89
<i>Obrázek 42: Sekvence snímků plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasicí koncentrace Ar v obtoku plamene pohárkového hořáku</i>	89
<i>Obrázek 43: Sekvence snímků plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasicí koncentrace CO_2 v obtoku plamene pohárkového hořáku</i>	90
<i>Obrázek 44: Vliv koncentrace hasicích látek na frekvenci oscilace plamene n-heptanu</i>	91
<i>Obrázek 45: Změny průměru a pozice paty plamene n-heptanu v závislosti na přidavku MEC N_2 do obtoku plamene pohárkového hořáku</i>	93
<i>Obrázek 46: Trend závislosti frekvence oscilace plamene n-heptanu na koncentraci O_2 v obtoku pohárkového hořáku</i>	94
<i>Obrázek 47: Synergie fyzikálních a chemických dějů vyvolaná přidavkem hasicí látky do okolního prostředí plamene n-heptanu</i>	95
<i>Obrázek 48: Vliv koncentrace hasicích látek na rychlosti odhořívání n-heptanu</i>	96
<i>Obrázek 49: Trendy závislostí intenzity vyzařování plamene n-heptanu na procentu MEC hasicích látek v obtoku pohárkového hořáku (1200 – 2570 nm)</i>	97
<i>Obrázek 50: Trendy závislostí intenzity vyzařování plamene n-heptanu na procentu MEC hasicích látek v obtoku pohárkového hořáku (350 – 1100 nm)</i>	98
<i>Obrázek 51: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene n-heptanu s přidavkem 30 % MEC argonu do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)</i>	98
<i>Obrázek 52: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene n-heptanu s přidavkem 60 % MEC argonu do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)</i>	99

<i>Obrázek 53: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene n-heptanu s přidavkem 90 % MEC argonu do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)</i>	99
<i>Obrázek 54: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene n-heptanu s přidavkem 30 % MEC argonu do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)</i>	101
<i>Obrázek 55: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene n-heptanu s přidavkem 30 % MEC argonu do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)</i>	102
<i>Tabulka 1: Složky SIMAX skla dle procentuálního hmotnostního podílu.</i>	52
<i>Tabulka 2: Horizontální a vertikální pozice fotodetektorů</i>	59
<i>Tabulka 3: Minimální hasicí koncentrace použitých plynných hasicích látek</i>	62
<i>Tabulka 4: Použité přístroje a látky</i>	70

Seznam symbolů

A	[-]	amplituda
A_m	[mm]	výška plamene
D	[m]	charakteristický rozměr (průměr) požáru
f	[Hz]	charakteristická frekvence tvorby vírů (frekvence oscilace plamene)
Fr	[-]	Froudeho číslo
g	[m.s ⁻²]	tíhové zrychlení
L	[m]	charakteristická délka
l	[m]	charakteristická délka hořáku
M_r	[-]	relativní molekulová hmotnost
Pr	[-]	Prandtlovo číslo
q_l	[l.min ⁻¹]	objemový průtok (vzduchu, směsi vzduchu a hasicí látky) v obtoku pohárkového hořáku (40 l.min ⁻¹)
$Q_{1,metan}$	[ml.min ⁻¹]	objemový průtok metanu pohárkem (369,5 ml.min ⁻¹)
$Q_{2,metan}$	[ml.min ⁻¹]	objemový průtok metanu pohárkem (461,8 ml.min ⁻¹)
$Q_{3,metan}$	[ml.min ⁻¹]	objemový průtok metanu pohárkem (554,2 ml.min ⁻¹)
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
Ri	[-]	Richardsonovo číslo
Ri_0	[-]	počáteční Richardsonovo číslo
S_n	[cm ²]	plocha požáru
St	[-]	Strouhalovo číslo
t	[s]	čas
u	[m.s ⁻¹]	charakteristická rychlost
u_f	[m.s ⁻¹]	počáteční rychlost proudění paliva
v_1	[cm.s ⁻¹]	výstupní rychlost metanu z pohárku (1 cm.s ⁻¹)
v_2	[cm.s ⁻¹]	výstupní rychlost metanu z pohárku (1,25 cm.s ⁻¹)
v_3	[cm.s ⁻¹]	výstupní rychlost metanu z pohárku (1,5 cm.s ⁻¹)
w	[m]	charakteristická šířka hořáku
X_O	[%]	objemová koncentrace kyslíku
ϕ	[-]	poměr ekvivalence paliva („ <i>fuel equivalence ratio</i> “)
ν	[m ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita
ν_F	[mol]	látkové množství paliva
$\nu_{F,st}$	[mol]	látkové množství paliva ve stechiometrické směsi
ν_O	[mol]	látkové množství oxidačního prostředku
$\nu_{O,st}$	[mol]	látkové množství oxidačního prostředku ve stechiometrické směsi
ν_P	[mol]	látkové množství produktů hoření
ρ_P	[kg.m ⁻³]	hustota média ve vznosném proudu
ρ_∞	[kg.m ⁻³]	hustota okolního prostředí (vzduchu)

Seznam zkratek a značek

AIR	Vzduch („ <i>Air</i> “)
Ar	Argon („ <i>Argon</i> “)
ASCII	Americký standardní kód pro výměnu informací („ <i>American Standard Code for Information Interchange</i> “)
BNC	Bajonetový konektor („ <i>Bayonet Nut Coupler</i> “)
CCTV	Uzavřený televizní okruh („ <i>Closed Circuit Television</i> “)
CO ₂	Oxid uhličitý („ <i>Carbon dioxide</i> “)
CTT	Centrum transferu technologií
EPS	Elektrická požární signalizace
et al.	a kolektiv („ <i>et alii</i> “)
FBI VŠB - TUO	Fakulta bezpečnostního inženýrství Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava
FFT	Rychlá Fourierova transformace („ <i>Fast Fourier Transformation</i> “)
CH ₄	Metan („ <i>Methan</i> “)
InGaAs	Indium galium arzenid („ <i>Indium gallium arsenide</i> “)
IR	Infračervená („ <i>Infrared</i> “)
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci („ <i>International Organization for Standardization</i> “)
MEC	Minimální hasicí koncentrace („ <i>Minimum Extinguishing Concentration</i> “)
N	Dusík („ <i>Nitrogenium</i> “)
NFPA	Národní asociace požární ochrany („ <i>National Fire Protection Association</i> “)
p.a.	Chemikálie pro analýzu, chemikálie pro analytické účely, („ <i>pure for analysis</i> “) (<i>Obsah základní látky se pohybuje mezi 99,0 - 99,8 %, fyzikální vlastnosti odpovídají literárním údajům, jednotlivé nečistoty jsou přítomny jen v tisícinách procenta, látka nesmí obsahovat mechanické nečistoty.</i>)
PAH	Polycyklické aromatické uhlovodíky, Polyaromatické uhlovodíky („ <i>Polycyclic aromatic hydrocarbon</i> “)
PBZ	Požárně bezpečnostních zařízení
PC	Osobní počítač („ <i>Personal computer</i> “)
PENTA	Výrobce a dodavatel čistých, laboratorních, speciálních, farmaceutických a technických chemikálií
R/C	Výstupní /ovládací (vstupně/výstupní ovládací) jednotka („ <i>Readout/Control</i> “)
SHZ	Stabilní hasicí zařízení
Si	Křemík („ <i>Silicium</i> “)
SIAD	Evropská společnost pro výrobu a aplikace technických a speciálních plynů („ <i>Società Italiana Acetilene e Derivati Spa</i> “)
txt	Textový soubor („ <i>Text file</i> “)
USB	Univerzální sériová sběrnice („ <i>Universal Serial Bus</i> “)
VFD	Videodetekce požáru („ <i>Video Fire Detection</i> “)
VIS	Viditelná („ <i>Visible</i> “)
ZOTK	Zařízení pro odvod tepla a kouře

1 Úvod

Typickým architektonickým znakem v současnosti budovaných objektů je využití velkých nečleněných prostor. Příkladem takových objektů jsou například rozsáhlé výrobní a skladovací haly, supermarkety nebo multifunkční zábavní centra. Provozování objektů zmiňovaného charakteru s sebou přitom přináší kumulaci vysokých hodnot majetku do jednoho místa, umísťování výrob i zboží v prostorech nečleněných na menší požární celky a často také přítomnost velkého počtu osob. Uvedené skutečnosti mohou představovat v případě vzniklého požáru vysoké riziko ohrožení přítomných osob i finančních ztrát na majetku.

Jedinou z možností, která u objektů zmiňovaného charakteru umožní zachovat požadovanou architektonickou dispozici při naplnění stále se zpřísnujících požadavků z oblasti požární bezpečnosti staveb, je instalovat v objektech nebo jeho částech některé z požárně bezpečnostních zařízení (PBZ). Velmi časté jsou v praxi také případy, kdy je situaci možné vyřešit pouze za předpokladu, že je použito instalace většího počtu požárně bezpečnostních zařízení. Nejfrekventovanějším případem je kombinace systému elektrické požární signalizace (EPS), systému stabilního hasicího zařízení (SHZ) a zařízení pro odvod tepla a kouře (ZOTK). V souvislosti s takto koncipovaným řešením však vzniká problém, jak účelně koordinovat funkci všech těchto systémů v konkrétní situaci. Nevhodně navržená koordinace přitom může působit spíše negativně a situaci při vzniklém požáru paradoxně komplikovat. Bebčák [65] v souvislosti s problematikou koordinace funkcí požárně bezpečnostních zařízení konstatuje, že v současné době není stanoven ani popsán v žádném právním předpisu nebo dokumentaci výrobce návod na stanovení koordinací funkcí. Lze tedy říci, že integrace požárně bezpečnostních zařízení a koordinace jejich funkcí závisí pouze na znalostech zpracovatele požárně bezpečnostního řešení stavby, a to nejen z pohledu preventivní požární ochrany, ale i z hlediska represe.

I přes snahu projektantů a techniků minimalizovat vliv lidského faktoru na systém koordinace funkcí PBZ při jejich integraci není přesto stále možné ve všech případech zajistit optimální využití potenciálu konkrétního zařízení. Typický případ může představovat ovládání systému hašení prostřednictvím systému detekce požáru. Optimální koordinací by v případě požáru bylo nejen prostřednictvím systému detekce požáru aktivovat systém hašení, ale také tento systém na základě kontinuálního monitorování

procesů hašení a podmínek v místě požáru v nejkratší možné době po uhašení požáru deaktivovat. Takto nastavená koordinace funkcí by umožnila nejen uhašení požáru, ale také minimalizaci ztrát vzniklých zbytečnou aplikací hasicí látky do místa požáru.

Detekce vznikajícího požáru i jeho monitorování v průběhu procesu likvidace vyžaduje nejen citlivé a vhodně zvolené nástroje diagnostiky procesu hoření (volba vhodných principů detekce), ale také vhodně navržený algoritmus vyhodnocování průvodních jevů. Práce je zaměřena na ověření možnosti použití metod videodetekce plamene pro monitorování procesu hašení s využitím plyných hasicích látek. U plyných hasicích látek jsou uvažovány pouze látky s fyzikálním mechanismem hašení, jejichž použití v systémech hašení požáru není v současné době časově omezeno.

1.1 Současný stav problematiky

Současné přístupy začlenění samočinných systémů hašení požáru do organizace a účelného fungování protipožární ochrany objektů řeší problém integrace a koordinace funkcí pouze z pohledu možného vzájemného se negativního ovlivňování požárně bezpečnostních zařízení (především SHZ a ZOTK). Koncepce řešení je tak dnes založena na stanovení časové návaznosti funkcí těchto zařízení, viz [65], [67], [68], [77]. Optimální koordinace funkcí ale představuje něco více. V případě systému hašení lze za optimální, tj. nejvýhodnější, považovat dosažení takového stavu, kdy by bylo ve vhodnou dobu maximálně využito potenciálu tohoto zařízení při minimální možné vynaložené investici a minimálním dopadu jeho funkce na okolí. Minimalizace vynaložené investice a dopadů funkce systému hašení na okolí by zahrnovala především omezení ztrát v důsledku aplikace nadbytečného a pro likvidaci požáru již nevyužitého množství hasicí látky. Využití pouze potřebného množství hasicí látky by umožnilo rovněž zabránit negativnímu působení hasicí látky, tj. poškození vybavení objektů, znečištění a poškození skladovaného materiálu nebo poškození technických zařízení. Naplnění uvažovaného stavu je ale podmíněno přítomností prvků nebo systémů, které by byly schopny na základě monitorování a vyhodnocování aktuální situace usměrnit a optimalizovat funkci systémů hašení. Šlo by tedy o vytvoření tzv. systému zpětné vazby.

U samočinného stabilního hasicího zařízení sprinklerového typu, které využívá jako hasicí látku vodu, lze za tento systém zpětné vazby považovat využití tzv. on-off

sprinklerové hlavice („*on-off sprinkler head*“). Tato hlavice je opatřena teplocitlivým reakčním prvkem (bimetalovým diskem) a mechanismem, který na základě vyhodnocování aktuální teploty v místě instalace otevírá a uzavírá hlavici hasicího zařízení. Otevření nebo uzavření hlavice následně vede k aktivaci nebo deaktivaci systému hašení, viz [69], [70], [71], [72]. Koncepce využití on-off sprinklerové hlavice u sprinklerového hasicího zařízení s tzv. opakovanou funkcí však představuje v současné době jediný zaznamenaný a reálný systém realizace zpětné vazby využívaný u systému hašení požáru.

Při aplikacích jiných typů hasicích zařízení, jako například práškových, halonových nebo plynových stabilních hasicích zařízení, obvykle k výrazným rychlým změnám teplot v místě požáru v průběhu hašení nedochází. Z tohoto důvodu je pro koordinaci funkcí zmiňovaných hasicích zařízení nutné použít jiné, mnohem sofistikovanější metody detekce i systému realizace zpětné vazby.

Za možnou alternativu lze u těchto typů hasicích zařízení považovat využití systému elektrické požární signalizace (EPS). Mezi výhody uvedeného způsobu řešení by bylo možné zahrnout především níže uvedené skutečnosti:

1. Systém EPS patří mezi vyhrazené druhy požárně bezpečnostních zařízení (PBZ), a tedy při ovládání systému hašení by tak nedocházelo k problému, že by vyhrazené PBZ (SHZ) bylo ovládáno nevyhrazeným PBZ.
2. Technicky lze ovládání systému hašení při použití EPS realizovat jednoduše s využitím výstupu ústředny EPS nebo vstupních ovládacích jednotek zařazených do hlásicích linek, podrobněji popsáno například v *Bitala* [67].
3. Systém EPS je autonomní systém, který není funkčně závislý na jiném v objektu instalovaném systému.
4. Ovládání systému hašení lze při využití systému EPS vhodně funkčně svázat s informací od konkrétního hlásiče nebo funkční skupiny hlásičů.

Otázkou při využití systému EPS ale stále zůstává, jak monitorovat průběh procesu hašení. Stávající systémy EPS používají pro identifikaci a detekci požáru nejčastěji bodových nebo lineálních prahových detektorů kouře, teplot nebo plynů. Prahový detektor sleduje vývoj fyzikálního parametru a signalizuje požár až v okamžiku, kdy je překročena předem stanovená hodnota tohoto parametru. Sofistikovanější metody odvození prahové

úrovně detekce představují algoritmy vícekritériálních hlásičů využívající fuzzy-logiky, podrobněji popsáno v [73], [74], [75]. Společným znakem hlásičů požáru s prahovou úrovní detekce je, že reakce hlásičů závisí na změně sledovaného parametru v čase. Tyto hlásiče proto reagují s určitým časovým zpožděním. Časové zpoždění představuje doba od vzniku požáru až do okamžiku, kdy je dosaženo definované úrovně prahové hodnoty. Dobu potřebnou k reakci systému detekce, tj. dobu pro dosažení prahové úrovně, ovlivňuje celá řada okolností, mezi které patří například rozsah požáru, geometrie prostoru, typ hlásiče, podmínky v místě požáru a další. Jednoduché metody predikce doby reakce bodových hlásičů kouře a tepla jsou podrobněji popsány například v literatuře *Bitala a kol.* [76].

Dalším podstatným faktem, který souvisí s využitím prahových bodových a lineárních hlásičů je, že parametry svázané s kouřem nebo teplotou nejsou pro monitorování procesu hašení vhodné. Proces hašení s využitím práškových, halonových a plynových SHZ není s ohledem na místo instalace prahových hlásičů doprovázen rychlou kvantitativní změnou parametru detekce. Hlásiče se instalují převážně u stropu místnosti nebo v prostoru, kde se parametry svázané s kouřem nebo teplotou i v průběhu hašení mění jen velmi pomalu. Mezi tyto parametry patří především koncentrace kouře, optická hustota kouře, teplota ve vrstvě kouře a rychlost změny těchto parametrů v čase.

S ohledem na uvedené skutečnosti je pro monitorování procesu hašení a realizaci zpětné vazby, která by umožnila optimalizovat koordinaci funkcí těchto typů SHZ, potřeba využít jiných metod detekce. Jednou z alternativně možných metod, která se pro tento účel jeví jako vhodné řešení, je metoda videodetekce. Konkrétně pak metoda videodetekce plamene, která je založena na identifikaci plamene v obrázcích videa. Bližší popis metod videodetekce a parametrů požáru, které jsou u algoritmů vyhodnocování využívány, lze nalézt v následujících kapitolách předložené disertační práce (viz kapitoly 3 až 4.3.2).

2 Cíle a hypotézy

Cílem disertační práce je:

- Ověřit možnost využití metod videodetekce plamene pro monitorování procesu hašení požáru za použití vybraných plynných hasicích látek.

Dílčím cílem disertační práce je:

- Zjistit, jak ovlivňuje koncentrace vybraných plynných hasicích látek pod úrovní minimální hasicí koncentrace (snížená koncentrace kyslíku) v atmosféře frekvenci oscilace plamene zvoleného plynného a kapalného paliva.

Pro naplnění cílů disertační práce je s ohledem na použití metody laboratorního experimentu nutné provést následující kroky:

- Navrhnout experimentální sestavu pro testování metod optické detekce požáru (systémů videodetekce požáru a hlásičů vyzařování plamene).
- Realizovat experimentální sestavu a využít tuto sestavu pro sérii laboratorních měření orientovaných na zjištění závislosti frekvence oscilace plamene na koncentraci plynné hasicí látky v okolní atmosféře plamene (monitorování hydrodynamických nestabilit).

Pracovní hypotézy:

1. Přítomnost plynné hasicí látky (inertního plynu) ovlivňuje procesy hoření a charakter vyzařování plamene.
2. Změna koncentrace plynné hasicí látky a koncentrace kyslíku v atmosféře je doprovázena změnou oscilačního chování plamene.
3. Přídavek hasicí látky na hranici minimální hasicí koncentrace ovlivňuje parametry plamene využívané pro detekci požáru u systému videodetekce plamene.

Práce je zaměřena především na parametr frekvence oscilace plamene, který je jako jeden z klíčových údajů využíván pro identifikaci a detekci požáru u systémů videodetekce plamene. Orientace na tento dílčí parametr vychází ze skutečnosti, že s využitím parametrů

jako jsou například optická hustota kouře, koncentrace kouře, teplota v místě požáru apod., nelze provádět kontinuální monitorování („*on-line monitoring*“) procesů hašení (s využitím plyných hasicích látek) z důvodu jejich pomalé kvantitativní časové změny v místě požáru.

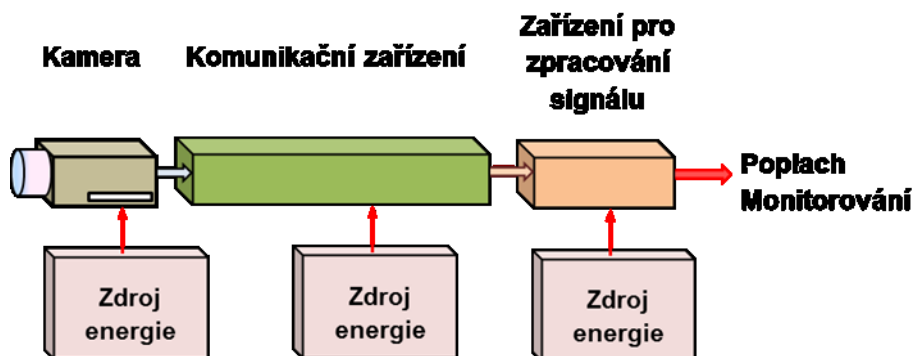
3 Videodetekce požáru

Systém elektrické požární signalizace představuje jeden z nejdůležitějších systémů detekce v objektech. Slouží k rychlé identifikaci, lokalizaci a signalizaci požáru. V současnosti je funkce většiny těchto systémů založena na využití bodových hlásičů nebo senzorů, jejichž detekční schopnost je závislá na rozmístění v daném prostoru. Pro vysokou spolehlivost detekce je proto nutné zajistit „hustou“ síť rozmístění hlásičů (senzorů) v prostoru [51].

Díky rychlému vývoji videotechnologií i technologií zpracování videa se v současné době stále častěji objevují snahy nahradit konvenční systémy detekce požáru modernějšími, využívajícími pro detekci i lokalizaci požáru obrazový záznam a jeho zpracování za použití počítačových systémů, tj. systémy videodetekce požáru (VFD - Video Fire Detection). Systém videodetekce požáru využívá ve srovnání s tradičními systémy detekce založenými na hlásičích teplot, kouře nebo plynů pro identifikaci a lokalizaci požáru relativně nových technologií. I přesto je ale vzhledem k tomu, že i tyto systémy vyhodnocují průvodní jevy požáru, jako je kouř nebo plamen, lze všeobecně považovat za detektory kouře, plamene nebo jejich kombinaci. Z praktického pohledu má systém videodetekce požárů mnoho potenciálních výhod, jakými jsou například níže uvedené:

1. Pro realizaci systému videodetekce požáru lze využít prvků většiny uzavřených televizních okruhů (CCTV - Closed Circuit Television), které dnes tvoří standardní součást vybavení mnoha budov.
2. Při využití prvků systému CCTV lze systém videodetekce požáru realizovat s minimálními dodatečnými náklady.
3. Systém videodetekce představuje „objemový“ senzor, umožňující snímat velkou oblast pouze jedním „snímačem“.
4. Systém videodetekce nevykazuje výrazné zpoždění ve vztahu k rychlosti detekce, jak je tomu u konvenčních bodových hlásičů teplot nebo kouře.
5. Systém videodetekce umožňuje kontinuální sledování i vyhodnocování parametrů požáru, jenž nabízí možnost aktuálně reagovat na změny.

Blokové schéma systému videodetekce požáru je zobrazeno na níže uvedeném **Obrázku 1**.



Obrázek 1: Blokové schéma systému videodetekce požáru

Typický systém videodetekce požáru sestává z jedné nebo několika videokamer připojených ke komunikačnímu zařízení. Komunikační zařízení zajišťuje přenos videosignálu z kamery do zařízení pro zpracování signálu. Zařízení pro zpracování signálu disponuje softwarovými algoritmy, které umožňují v sekvenci snímků videosignálu identifikovat kouř nebo plamen, případně oba. Po identifikaci některého z těchto průvodních znaků požáru zajistí zařízení pro zpracování signálu následně vyhlášení poplachu.

Komunikačním zařízením může být analogové, a to i tak jednoduché jako je koaxiální kabel, nebo může obsahovat hardwarové prvky jako přepínače (*switches*) a distribuční zesilovače. Alternativně může být zcela digitální, realizované ethernetovým kabelem nebo směrovači (*routers*) a bránami (*gateways*). V principu mohou být rovněž některé z komunikačních zařízení bezdrátové. V obou případech, ať již analogového nebo digitálního komunikačního zařízení, lze komunikačním zařízením přenášet rovněž další videa nebo data. Systém prezentovaný na výše uvedeném obrázku je přitom pouze jednou z možných alternativ realizace systému videodetekce požáru. Jako u každého počítačového systému existuje i v tomto případě celá řada možných alternativ realizace včetně té, kdy je zpracování signálu i softwarový algoritmus detekce zakomponován do kamery [50].

3.1 Techniky identifikace požáru

Detekce požáru není v případě videodetekce založena na sledování fyzikálních parametrů, jakými jsou například teplota, optická hustota kouře, koncentrace požárního aerosolu ve střeženém prostoru apod. Softwarové algoritmy zpracování signálu místo toho

ve videu identifikují a vyhodnocují znaky, které korespondují s jednou nebo více optickými charakteristikami požáru. Jako příklad lze uvést tvar nebo pohyb vzestupného sloupce kouře u algoritmů navržených pro detekci kouře. U algoritmů orientovaných na detekci plamene jde pak například o charakteristickou barvu plamene, tvar plamenné oblasti nebo oscilaci plamene. Tyto charakteristické znaky jsou při rozhodování, zda se jedná o požár, vyhodnocovacím modulem v čase vzájemně kombinovány, například za využití neuronových sítí nebo fuzzy logiky. Přehled vybraných technik videodetekce požáru orientovaných na detekci kouře a plamene je uveden v následujících kapitolách.

3.1.1 Techniky videodetekce kouře

Klíčové reprezentativní techniky videodetekce požáru, orientované na identifikaci kouře v obrazech videa, a popis postupů vyhodnocení sumarizuje následující text:

1. *Fujiwara a Terada* [52] použili při detekci kouře konceptu fraktálního kódování. Při extrakci využili toho, že se v kouři formují oblasti s velmi podobným tvarem a v kódu získaném fraktálním kódováním obrazu hledali charakteristické znaky kouřových ploch.
2. *Kopilovic et al.* [53] využili nepravidelností v pohybu kouře v důsledku jeho nestability. Provedli výpočet a vizualizaci proudového pole s využitím dvou za sebou následujících obrázků. Následně použili entropii distribuce kouře ve směrech jeho šíření jakožto klíčový znak pro odlišení pohybu kouře od pohybů s kouřem nesouvisejících.
3. *Töreyin et al.* [54] z obrázků videa nejdříve vybrali znaky jako pohyb, oscilace/blikání („*flickering*“) a zatemnění okrajů. Pro extrakci těchto znaků využili metod odečtení pozadí a časové a prostorové wavelet transformace. (Wavelet transformace využívající dlouhá okna tvaru wavelet funkce, poskytuje informace o tom, kdy a kde se vyskytují různé frekvenční složky signálu. Okno se posouvá podél signálu a pro každou pozici se vypočítává korelace s tzv. dilatovanou vlnkou. Proces se opakuje vždy s nepatrně delším okénkem. Výsledkem je sada časově – frekvenčních reprezentací signálu v různých rozlišeních.)

4. *Vincente a Guillemant* [55] použili pro detekci kouře z videa sledování pohybů obrazových pixelů lokální dynamické obálky kouře. Pro identifikaci a extrakci pixelů využili shlukové vícerozměrné časové analýzy bodů. K odlišení kouře od různorodých přírodních jevů, jako například mraků nebo ve větru se naklánějícího stromu, které mohou být příčinou podobných obálek, použili znaky histogramu rozdělení pixelu v závislosti na jejich rychlosti.
5. *Grech – Cini* [56] navrhl algoritmus detekce kouře založený na monitoringu více než 20 znaků v obrázcích pocházejících z videa. Jsou to například procenta obrazových změn, korelace, rozdíly v obrázcích apod., které byly získány z referenčních a aktuálních obrázků videa. Pro odlišení pohybů kouře od jiných pohybů, které však s kouřem nesouvisí (viz předchozí odstavec), následně použili metodu analýzy dle předem stanoveného systému pravidel („*Rule – based analysis method*“) a Bayesovskou metodu analýzy.

K výše uvedeným algoritmům detekce kouře lze ještě doplnit, že frekvence oscilace kouřové obálky, někdy také označována jako frekvence oscilace/blikání kouře („*flickering frequency of smoke*“), je nižší než frekvence oscilace vlastního plamene. U pomalu se šířícího kouře může frekvence oscilace kouře dosahovat hodnot 2 ~ 3 Hz [50], [64].

3.1.2 Techniky videodetekce plamene

Klíčové reprezentativní techniky videodetekce požáru orientované na identifikaci plamene v obrázcích videa a popis postupů vyhodnocení sumarizuje následující text.

1. *Healy et al.* [58] navrhli algoritmus detekce založený na využití modelu barvy. Model barvy je použitý pro separaci barevných obrazových pixelů plamene od pixelů, které s plamenem nesouvisí. Pixely plamene jsou následně spojené do plamenných oblastí.
2. *Phillips et al.* [60] a *Dedeoglu et al.* [57] navrhli algoritmy, které v obrázcích videa nejdříve s využitím přednastavených modelů barvy detekují pixely s barvou plamene. Tyto pixely následně na základě charakteristických změn intenzity jasové složky obrazu v čase rozdělí na pixely, které reprezentují plamen a pixely, které plamen nerepresentují. (Charakteristická změna

intenzity vyzařování plamene v čase je označována jako oscilace/blikání plamene „*flickerig of flame*“). Přístupy obou uvedených autorů se liší v definování a nastavení modelů barvy, a také ve způsobu, jakým vypočítávají oscilaci plamene. Oba algoritmy však pro detekci sdílí společné znaky, tj. barvu a oscilaci.

3. *Lui a Ahuja* [59] použili ve svém algoritmu jako první modelu barvy, aby z obrázků videa segmentovali barevné oblasti plamene. To je obdobný přístup, jaký uplatnili Healy et al. Lui a Ahuja navíc ve svém algoritmu následně použili časových modelů, které jim umožnily klasifikaci tvarů barevných oblastí.
4. *Privalov a Shakutdinov* [61] se ve svém algoritmu rozhodli nepoužít modelu barvy, místo toho nejdříve v obrázcích videa hledali oblasti se zářivým statickým jádrem a dynamickými okraji. Následně s využitím přednastavených modelů (např. dopředných neuronových sítí) rozdělili tyto oblasti na oblasti plamene a oblasti, které plamen neprezentují.

Společnými znaky algoritmů videodetekce požáru orientovaných na identifikaci plamene v obrázcích pocházejících z videa je využití charakteristických barev plamene a časové změny intenzity vyzařování plamene, tj. frekvence oscilace plamene [64]. Barva plamene vzhledem k využití viditelné oblasti spektra (380 – 760 nm [62]) úzce souvisí především s vyzařováním sazí v plameni, tj. jejich vznikem, formováním a oxidací v plameni (podrobněji, viz kapitola 4.3.2 disertační práce). Frekvence oscilace plamene pak s celou řadou faktorů, jakými jsou např. tvar a velikost základu plamene, koncentrace kyslíku v okolním prostředí plamene apod. (podrobněji, viz kapitola 4.3 disertační práce).

Velmi důležitou skutečností v případě videodetekce plamene ve vztahu k frekvenci oscilace plamene je rovněž vzájemný vztah mezi frekvencí pozorovaného jevu, tj. frekvencí oscilace plamene, a frekvencí pozorování, tj. snímkovou frekvencí záznamového zařízení. Shannonův (Shannonův – Kotělníkův) teorém definuje, že vzorkovací frekvence záznamového zařízení (např. videokamery) musí být alespoň dvakrát vyšší než frekvence signálu zachycovaného jevu (např. frekvence oscilace plamene). Při snímkové frekvenci záznamového zařízení, která je u většiny systémů videodetekce 25 Hz (25 snímků

za sekundu), tak lze identifikovat pouze parametr měnící se s frekvencí menší než 12,5 Hz [63].

4 Plamen

Plamen je obvykle popisován jako oblast, kde dochází k reakci mezi palivem a oxidačním prostředkem. Tato reakce je velmi často doprovázená emisí záření ve formě žlutého světla [32], [33]. Zjednodušeně lze plamen charakterizovat jako strukturu reaktivních i reagujících plynů a rozptýlených pevných, případně také kapalných částic.

Ve vztahu k požární ochraně představuje vznik plamene vrcholné stádium rozvoje ohniska požáru. Ke vzniku plamene dochází při hoření látek a materiálů, které v důsledku tepelné degradace uvolňují hořlavé plynné produkty neobsahující kyslík. Nutným předpokladem jejich hoření je proto přístup oxidačního prostředku nejčastěji v podobě vzdušného kyslíku. Ve vnější části plamene tak probíhá proces aktivace a ve vnitřní části pak kumulace horkých plynných produktů. Objem vnitřní části plamene závisí na ploše uvolňující plynné produkty, rychlosti jejich uvolňování (nebo vypařování) a rychlosti hoření.

Jako chemicky reaktivní systém má plamen exotermický charakter reakce projevující se tepelným i světelným zářením o intenzitě a spektru vlnových délek závislém na teplotě a složení chemických specií v daném místě a čase. Chemické složení plamene je výrazně ovlivňováno nejen vlastní hořlavou látkou, ale také podmínkami v místě požáru, jakými jsou například koncentrace kyslíku nebo aktuální teplota plamene.

Z hlediska způsobu vytváření hořlavého souboru, tj. mísení paliva s oxidačním prostředkem a režimu hoření, lze dle [26], [32], [34], [35] rozlišovat:

- plamen předmísený (kinetický),
- plamen nepředmísený (difuzní):
 - plamen nepředmísený laminární,
 - plamen nepředmísený turbulentní.

4.1 Předmísený plamen

Předmísený plamen vzniká v případech, kdy se palivo s oxidačním prostředkem nejdříve vzájemně smísí. K hoření dochází až po vzájemném promísení paliva s oxidačním prostředkem za předpokladu, že vzniklá směs spadá do rozsahu hořlavosti. Termín rozsah

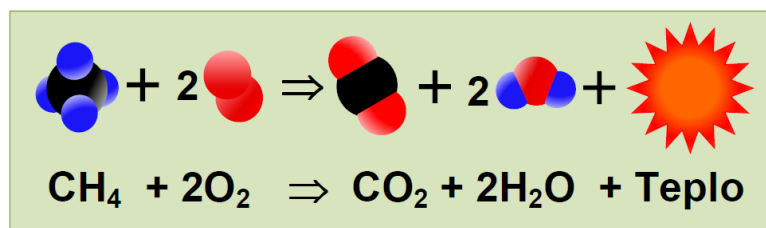
hořlavosti („*flammability range*“) je užíván ve významu, kdy je palivo rovnoměrně distribuováno a smíseno s oxidačním prostředkem mezi dolní a horní hranici hořlavosti. Rozsah hořlavosti je přitom rozdílný pro konkrétní hořlavou látku, a to jak v případě čistých plynů, tak i pro páry hořlavých kapalin a pyrolýzní plyny pevných látek. Typ paliva (**F**) a jeho poměr k oxidačnímu prostředku (**O**) v hořlavé směsi ovlivňuje průběh chemických reakcí i vlastnosti plamene. Základ fenoménu šíření předmíseného plamene spočívá v difuzních procesech, kdy nutné gradienty vytváří probíhající chemické reakce [26]. V případě, že obecnou rovnici hoření definujeme ve tvaru rovnice (1):



pak je poměr ekvivalence paliva ϕ („*fuel equivalence ratio*“) stanoven podílem:

$$\phi = \frac{v_F \cdot v_{O,st}}{v_O \cdot v_{F,st}} \quad (2)$$

V rovnicích (1) a (2) symbolizují v_F látkové množství paliva [mol], v_O látkové množství oxidačního prostředku [mol], v_P látkové množství produktů hoření [mol], $v_{O,st}$ a $v_{F,st}$ látkové množství kyslíku, respektive paliva při hoření ve stechiometrickém poměru [mol], tj. v případě, kdy jsou všechny molekuly paliva reakcí plně transformovány na konečné produkty spalování. Těmi jsou při spalování uhlovodíků oxid uhličitý (CO_2), vodní pára (H_2O) a teplo. Schematicky je tato situace u stechiometrické směsi metanu s kyslíkem ($\phi = 1$) znázorněna na **Obrázku 2**.



Obrázek 2: Ilustrace dokonalého hoření metanu při stechiometrické koncentraci

Při přebytku paliva ($\phi > 1$), to je případ, kdy se poměr paliva a oxidačního prostředku ve směsi pohybuje mezi stechiometrickým poměrem a horní hranicí hořlavosti („*upper flammability limit*“), je směs označována jako bohatá na palivo („*fuel rich*“). Při přebytku oxidačního prostředku ($\phi < 1$), kdy se poměr paliva a oxidačního prostředku

ve směsi pohybuje mezi stechiometrickým poměrem a dolní hranicí hořlavosti („*lower flammability limit*“), je směs označována jako chudá na palivo („*fuel lean*“).

Při požárech probíhá hoření formou předmíseného plamene nejčastěji v okamžiku iniciace nebo při rychlých hořeních, tj. explozích a detonacích. Jako příklady lze uvést počáteční stadium požáru louže („*pool fire*“) nebo explozi kouřových plynů („*smoke gas explosion*“) u požárů v uzavřeném prostoru. Je také nutné poznamenat, že formou předmíseného plamene mohou probíhat lokálně procesy hoření rovněž v určitých oblastech nepředmíseného plamene. V tomto smyslu se může jednat například o oblasti u paty laminárního nepředmíseného plamene, kde dochází k přísávání obtékajícího vzduchu. U turbulentního nepředmíseného plamene pak v oblastech, kde se vlivem vírových struktur vytváří předmísené kapsy neinicované směsi hořlavých (nebo nespálených) plynů a par s oxidačním prostředkem [36].

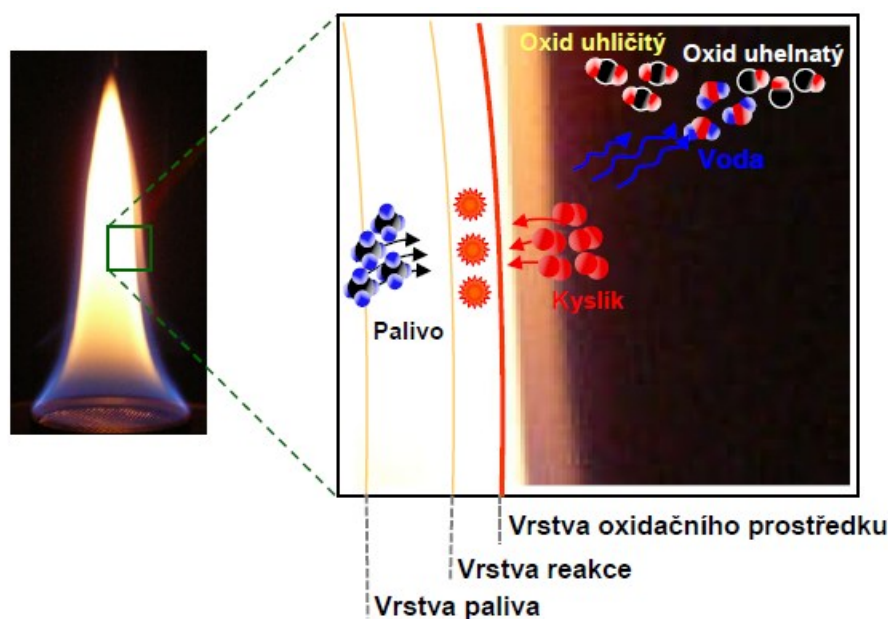
4.2 Nepředmísený plamen

U nepředmíseného plamene probíhají procesy hoření na rozhraní proudu paliva a oxidačního prostředku. Mísení paliva s oxidačním prostředkem probíhá v důsledku difuze paliva a oxidačního prostředku do reakční vrstvy plamene („*reaction layer*“), někdy také označované jako zóny hoření („*combustion zone*“). K exotermní chemické reakci hoření dochází v případě, kdy dojde k smísení paliva s oxidačním prostředkem v určitém vzájemném poměru a vzniklá směs je dostatečně zahřátá pro iniciaci. Procesy hoření jsou u nepředmísených plamenů kontrolovány procesem vzájemného mísení paliva s oxidačním prostředkem, které probíhá rychlostí difuze. Z této skutečnosti vyplývá, že i když je hoření jednoznačně chemický jev, je rozhodující měrou ovlivňováno fyzikálními pochody.

I přes skutečnost, že se nepředmísený plamen při požárech může vyskytovat v různých formách, je možné tento druh plamene rozdělit na tři charakteristické vrstvy (zóny), a to:

- vrstvu paliva („*fuel layer*“),
- vrstvu reakce/reakční vrstvu („*reaction layer*“),
- vrstvu oxidačního prostředku („*oxygen layer*“).

Ve vrstvě paliva se nachází téměř výhradně plyny (páry) paliva, které se vlivem přenosu tepla zahřívají, dochází k jejich štěpení nebo vznikají reakce schopné částice (aktivované komplexy) [35]. Na tuto vrstvu bezprostředně navazuje vrstva reakce, kde řadou komplexních chemických reakcí probíhá vlastní proces hoření až k tvorbě konečných produktů, kterými jsou při spalování uhlovodíků oxidy uhlíku (CO , CO_2), vodní pára (H_2O) a teplo. Oxidační činidlo nezbytné pro průběh reakce hoření proniká do vrstvy reakce difuzí z vrstvy oxidačního prostředí. Schematicky je tento proces u nepředmíseného plamene metanu znázorněn na **Obrázku 3**.



Obrázek 3: Ilustrace nepředmíseného plamene

Hoření probíhá v případě nepředmíseného plamene přibližně stejnou rychlostí, s jakou do reakční vrstvy vzájemně difundují palivo a oxidační prostředek.

Fakt, že procesy hoření probíhají u nepředmíseného plamene na rozhraní proudu paliva a oxidačního prostředí, vede k tomu, že je proces mísení ovlivňován rychlostí vzájemného proudění obou těchto proudů, která závisí na rozdílu hustot plynů ve vrstvě paliva a vrstvě oxidačního prostředí. S ohledem na režim proudění může proto tvorba hořlavé směsi probíhat formou laminárního nebo turbulentního mísení. Tato skutečnost následně ovlivňuje režim hoření a dává vznik laminárnímu nebo turbulentnímu nepředmísenému plameni.

4.2.1 Laminární nepředmísený plamen

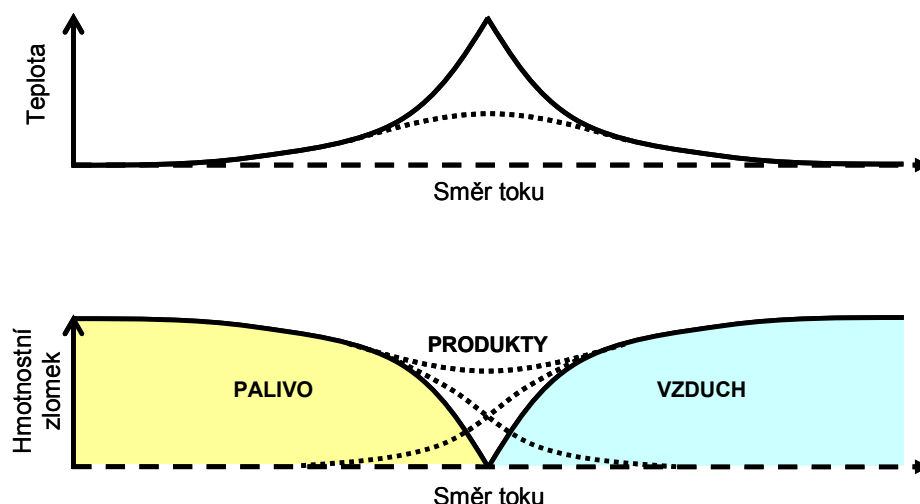
Laminární nepředmísený plamen vzniká v případech, kdy je vzájemná rychlost proudění proudů paliva a oxidačního prostředí nízká. Tvorba směsi paliva s oxidačním prostředkem probíhá formou laminárního mísení a hoření v reakční vrstvě je rovnoměrné.

Při požárech probíhá hoření formou laminárního nepředmíseného plamene převážně v počáteční fázi rozvoje plamenného hoření. V této fázi je teplota ve vrstvě paliva ve srovnání s teplotou v reakční vrstvě relativně nízká a tím i nízká rychlost vzájemného proudění proudu paliva a proudu oxidačního prostředí. Hoření je rovnoměrné a charakteristické nízkou rychlostí odhořívání.

Postupné zvyšování teploty ve vrstvě paliva vyvolané sdílením tepla převážně formou radiace z reakční vrstvy způsobuje zvyšování teploty ve vrstvě paliva i vzájemné rychlosti proudu paliva a proudu oxidačního prostředí. Pokud rychlost proudu paliva převyší rychlost mísení paliva s oxidačním prostředkem, dochází ke vzniku vírových struktur (v souvislosti s přítomností rozdílu hustot a působením vektoru gravitace) a k mísení paliva ve vírech. I v tomto případě dochází k mísení paliva s oxidačním prostředkem prostřednictvím difuze, ale hoření je nerovnoměrné, nepravidelné a vzniká turbulentní nepředmísený plamen.

4.2.2 Turbulentní nepředmísený plamen

Turbulentní nepředmísený plamen je charakteristický převážně pro fázi plně rozvinutého plamenného požáru nebo pro požár paliv s vysokou rychlostí odhořívání, jakými jsou například požáry kapalných uhlovodíků. Tyto požáry reprezentují velmi komplexní systém fyzikálně-chemických jevů zahrnující úzce provázané fenomény dynamiky tekutin, sdílení tepla a chemie hoření. Lokální parametry nepředmíseného turbulentního plamene přitom ovlivňuje nejenom přístup vzduchu a paliva, ale také produkce sazových částic a další dílčí jevy. Vznik turbulentního nepředmíseného plamene souvisí se vznikem turbulentního proudění, tj. tvorbou vírových struktur jako odezvy na rozsáhlé časové i prostorové fluktuace [38], [40], [41]. Turbulentní mísení ovlivňuje profily skalárních veličin, jakými jsou například teploty a koncentrace reaktantů nebo produktů v zóně hoření, viz **Obrázek 4**.

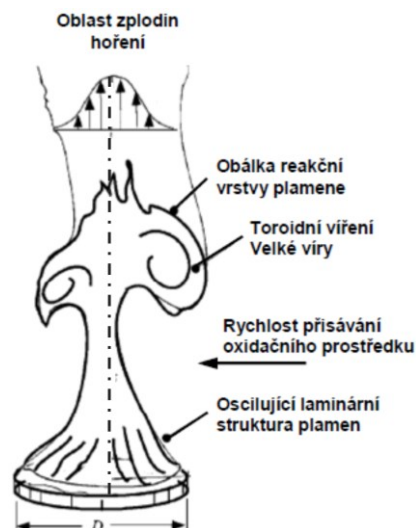


Obrázek 4: *Profily skalárních veličin v reakční zóně nepředmíseného plamene v laminárním (plná linie) a turbulentním (přerušovaná linie) režimu hoření [36]*

Vzájemné ovlivňování mezi jednotlivými fyzikálními a chemickými jevy v turbulentním plameni vyplývá ze skutečnosti, že turbulentní mísení není dostatečně rychlé ve srovnání s rychlostmi probíhajících chemických reakcí, respektive rychlostí šíření tepelné radiace. U nepředmíseného turbulentního plamene vytváří turbulentní proudění vírové kapsy, v jejichž středech je vysoký přebytek paliva, a v okrajových oblastech pak naopak přebytek oxidačního prostředí. Struktura turbulentního nepředmíseného plamene proto vykazuje značnou prostorovou nehomogenitu, jež se mění s časem. Tyto výrazné časové i prostorové fluktuace lokální stechiometrie hořlavé směsi a také v čase se měnící teploty v různých místech plamene jsou jednou z příčin vzájemného působení turbulence a chemie v plameni. Parametry hoření turbulentního nepředmíseného plamene ovlivňuje vznik gradientů teploty a koncentrace chemických specií, tj. reaktantů, meziproduktů i produktů hoření. Rychlost chemických reakcí pak následně stoupá vlivem nárůstu rychlosti přenosu (difuze) tepla i specií na molekulární úrovni [36], [39]. Schematicky je turbulentní nepředmísený plamen s charakteristickými vírovými strukturami prezentován na **Obrázku 5** [37], [28].

Velmi obecně lze na základě výše uvedeného konstatovat, že turbulentní nepředmísený plamen vykazuje následující hlavní charakteristickými rysy:

- nepravidelný vířivý pohyb,
- rychlou difuzi,
- tenkou nepravidelnou reakční vrstvu plamene.



Obrázek 5: Ilustrace turbulentního nepředmíseného plamene

4.3 Vírové struktury a oscilace plamene

Původ turbulentního proudění při požárech za běžných podmínek spočívá především ve vznášivém zrychlení zahřátých zplodin hoření, které mají nižší hustotu než okolní vzduch. Vlivem hydrodynamických nestabilit vznikajících na tomto rozhraní se v prostředí plamene přirozeně utváří komplexní vírové struktury, které jsou jedním z charakteristických projevů chování požáru. Podrobný kvantitativní rozbor procesu formování vírových struktur při požárech podává *Tiesen et al.* [38], přičemž formuluje tři následující zásadní principy související s tvorbou vírových struktur:

1. vznik rotačního pohybu v malých měřítcích v souvislosti s přítomností rozdílů hustot ve vrstvě paliva a oxidačního prostředí a působením vektoru gravitace (baroklinická vířivost),
2. růst velkorozměrových vírových struktur (amalgamace a párování),
3. turbulentní kaskádní proces rozpadu velkých vírů (produkce malých vírových struktur).

Na základě teorie podobnosti se pro popis turbulentních toků využívají bezrozměrná charakteristická čísla. Poměr inerciálních a vazkých sil při proudění tekutin popisuje dobře známé Reynoldsovo číslo Re ve formě rovnice (3):

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (3)$$

kde u symbolizuje charakteristickou rychlost [m.s^{-1}], L charakteristický rozměr [m] a ν kinematickou viskozitu [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]. V případě hydrodynamických nestabilit indukovaných tepelným vznosem, resp. gradientem hustot na rozhraní mezi dvěma vertikálními proudy, tvoří zásadní silovou složku působení gravitačního pole. Pro popis proudění, kde nestability vznikají na základě tohoto principu, se proto používá Richardsonovo číslo Ri obecně definované rovnicí (4):

$$Ri = \frac{(\rho_{\infty} - \rho_p) \cdot g \cdot L}{(\rho_{\infty} \cdot u^2)} \quad (4)$$

kde je ρ_{∞} hustota okolního prostředí (vzduchu) [kg.m^{-3}], ρ_p je hustota média ve vznosném proudu [kg.m^{-3}], g je tíhové zrychlení [m.s^{-2}] a u symbolizuje charakteristickou rychlost [m.s^{-1}]. V tomto kontextu se může jednat o plyn lehčí než vzduch, případně směs zahřátých reaktantů a produktů hoření. U nepředmíseného plamene, kde se projevují značné prostorové nehomogenity, lze jen obtížně definovat globální hodnotu hustoty. Jako vhodné kritérium proto například v případě laboratorních experimentů může sloužit „počáteční“ Richardsonovo číslo, které charakterizuje proudění pouze v místě vyústění paliva (do hořáku), přičemž platí rovnice (5):

$$Ri_0 = \frac{g \cdot d}{u_f} \quad (5)$$

kde d je průměr otvoru vyústění paliva [m] a u_f je počáteční rychlost proudění paliva [m.s^{-1}] a g je tíhové zrychlení [m.s^{-2}].

Experimentální data získaná pozorováním plamene různorodých paliv a rozměrů poukazují na pravidelné oscilace (pulsace) plamene, které vznikají v souvislosti s tepelně indukovanými hydrodynamickými nestabilitami, tj. tvorbou vírových struktur při procesech hoření. V odborné literatuře lze nalézt řadu empirických vztahů pro stanovení frekvence oscilace plamene v závislosti na tvaru (kruhový a nekruhový základ plamene) a rozměrech požáru (průměr hořáku, šířka a délka hořáku).

Experimentální pozorování pulsujících plamenů plyných, kapalných i pevných paliv v měřících od 0,07 m do 50 m [27] poukázala na korelaci mezi dvojicí charakteristických čísel, a to Froudeho číslem (Fr) a Strouhalovým číslem (St), pro které *Hamis et al.* odvodil mocninnou funkci ve tvaru rovnice (6):

$$St \approx Fr^{-0,57} \quad (6)$$

Tato podobnostní čísla, tedy bezrozměrné veličiny využívané k popisu hydrodynamických systémů, jsou popsána následující dvojicí rovnic (7) a (8):

$$Fr = \frac{u^2}{(L \cdot g)} \quad (7)$$

$$St = \frac{f \cdot L}{u} \quad (8)$$

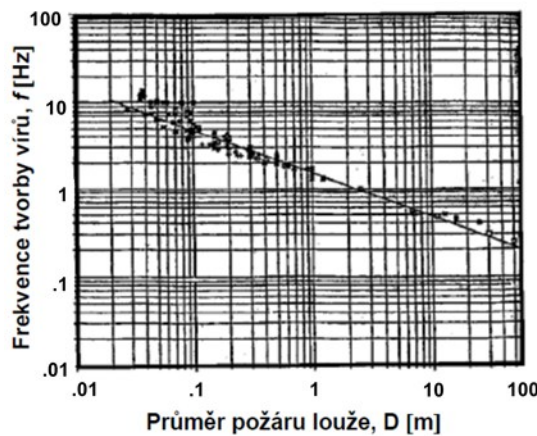
kde g je tíhové zrychlení [m.s^{-2}], u symbolizuje charakteristická rychlost proudění [m.s^{-1}], L charakteristická délka [m] a f je charakteristická frekvence vznikajících hydrodynamických nestabilit (frekvence oscilace plamene) [Hz]. Na základě kombinace empiricky zjištěného vztahu rovnice (6) a rovnic (7) a (8) odvodil *Hamis et al.* [27] pro účely praktických odhadů frekvence oscilace plamene f o kruhovém základu aproximaci (9), kde je charakteristická délka nahrazena charakteristickým rozměrem (průměrem) požáru D :

$$f \approx D^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

kde D představuje charakteristický průměr požáru [m].

Pagni [28] odvodil a uvádí pro tyto případy svou aproximaci ve tvaru rovnice (10), graficky rovněž, viz **Obrázek 6**.

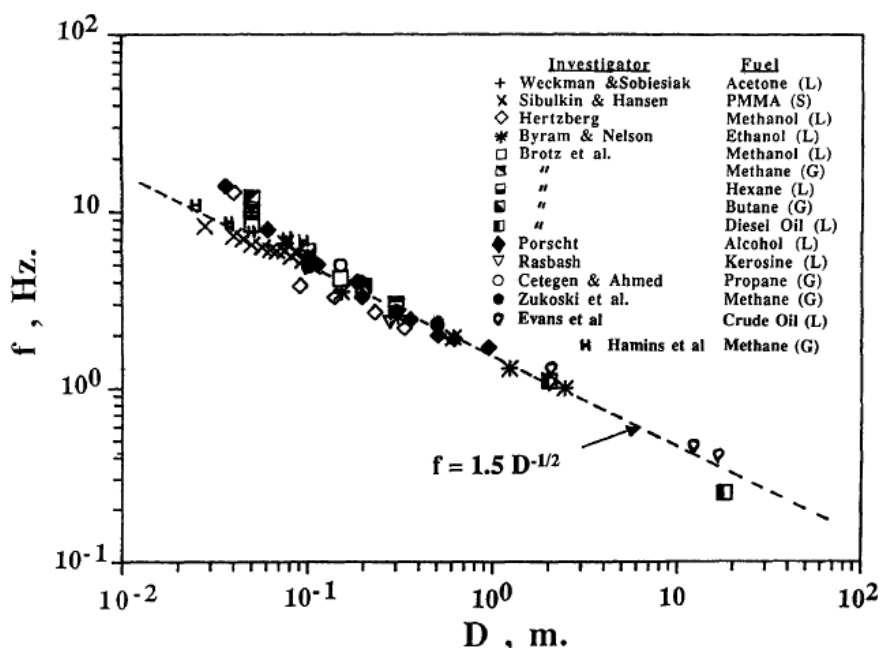
$$f = 0,48 \sqrt{\frac{g}{D}} \quad (10)$$



Obrázek 6: Závislost frekvence oscilace (frekvence tvorby vírů) plamene na průměru požáru louže dle *Pagni* [28]

K obdobné aproximaci v případě plamene o kruhovém základu jako *Pagni* došli *Cetegen a Ahmed* [25], kteří provedli souhrnné vyhodnocení experimentálních dat pozorování nepředmíseného plamene za různorodých okrajových podmínek (typů paliva, rozměru hořáku, apod.). Svou empirickou závislost využívanou pro odhad frekvence oscilace plamene při požáru stanovenou na základě rozboru těchto dat uvádí ve tvaru rovnice (11), viz rovněž **Obrázek 7**.

$$f = 1,5D^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$



Obrázek 7: Závislost frekvence oscilace plamene na průměru požáru (viz [25] a zde uvedené odkazy)

Ke stejným závěrům v případě frekvence oscilace plamene o kruhovém základu jako výše uvedení autoři dospěl rovněž *Thuillard* [29] při měřeních orientovaných na posouzení vlivu stěny na frekvenci pulsace plamene [42].

Zajímavá z pohledu diskutované problematiky je rovněž aproximace dle *Šarovarova* [11], který pro stanovení frekvence oscilace plamene uvádí rovnici (12) v následující podobě.

$$f = 24,15 \cdot S_n^{-0,3} \quad (12)$$

kde f je frekvence oscilace plamene [Hz] a S_n je plocha požáru [cm^2].

Zvláštností v případě rovnice (12) je vzhledem k jiným výše uvedeným vztahům to, že autor detailně nespecifikuje tvar základu plamene a při stanovení frekvence oscilace vychází z plochy zasažené požárem.

Pro plamen o nekruhovém základu byly v odborné literatuře pro stanovení frekvence oscilace plamene zaznamenány pouze aproximace, které uvádí *Thuillard* [29] ve tvaru rovnic (13) a (14). Autor konstatuje u hořáku s obdélníkovým základem délky l [m] a šířky w [m] následující níže uvedené:

1. Frekvence oscilace plamene je nezávislá na délce hořáku l v případech, kdy se délka hořáku mění mezi w a $5w$. Závislost frekvence oscilace plamene na geometrických rozměrech základu plamene, tj. délce a šířce paty plamene, je uváděna ve tvaru rovnice (13).

$$f = 1,25 \cdot w^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

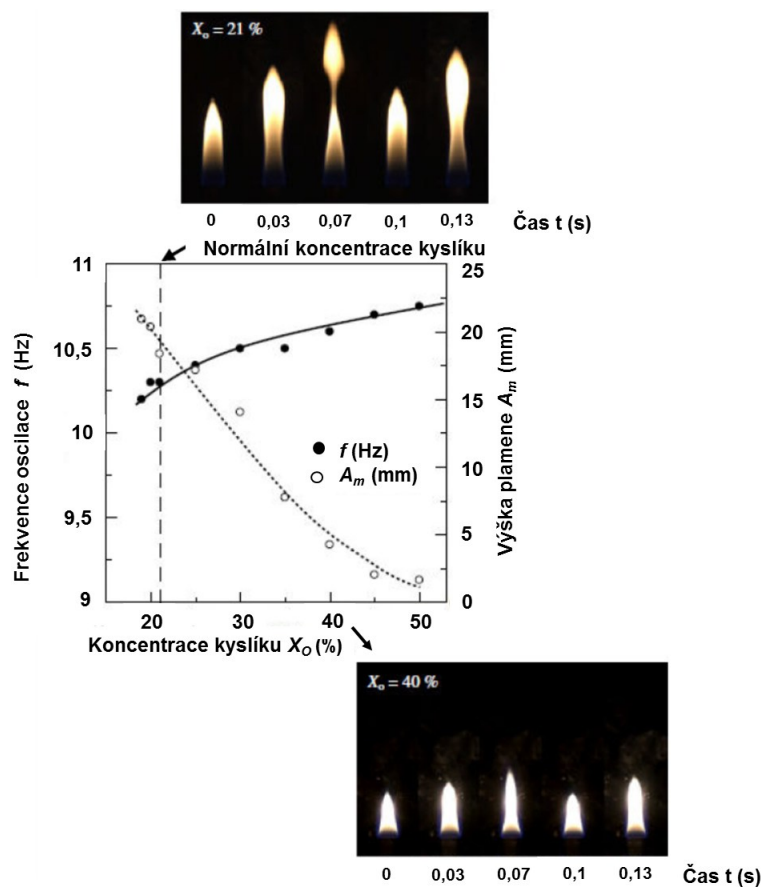
Tato aproximace dobře vyhovuje pro požáry, kdy je šířka požáru $w > 10$ cm.

2. V situaci, kdy je delší strana obdélníkového hořáku l navíc přiléhající ke zdi, je frekvence oscilace plamene taková, jako by byla šířka hořáku $2w$. Aproximace pro stanovení frekvence oscilace plamene je v tomto případě uváděna ve tvaru rovnice (14).

$$f = 1,25 \cdot (2w)^{-\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Je nutné poznamenat, že frekvenci oscilace plamene ovlivňuje rovněž přítomnost sazových částic v plameni i koncentrace oxidačního prostředí v okolním prostředí plamene. Vliv sazových částic, tj. vliv tepelné radiace vyzařované sazovými částicemi na oscilaci (mihotavý charakter) plamene, diskutuje studie *Katty et al.* [44]. Na vliv koncentrace oxidačního prostředí v okolním prostředí plamene poukazuje studie *Gotody et al.* [22]. Výsledky získané ze studie *Gotody et al.* znázorňuje **Obrázek 8**. Z uvedeného obrázku lze pozorovat, že zvyšující se koncentrace kyslíku v okolním prostředí nepředmísěného plamene (v uvedeném případě metanu) vede ke zvyšování frekvence oscilace a snižování výšky plamene. Detailnější popis výsledků obou uvedených studií nelze s ohledem na omezený rozsah disertační práce více diskutovat. Problematika vzniku

a formování sazí v plameni je v omezeném rozsahu dále diskutována v kapitole 4.3.2 disertační práce.



Obrázek 8: Frekvence oscilace plamene f a výška plamene A_m jako funkce koncentrace kyslíku X_O v okolním prostředí nepředmíseného plamene metanu [22]

4.3.1 Režimy oscilace plamene

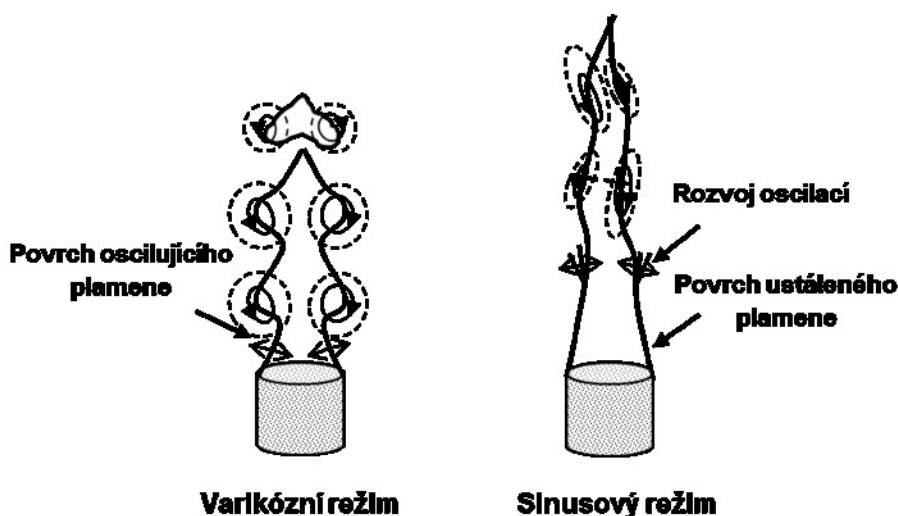
Ve vznášivých difuzních plamenech byly na základě laboratorních studií *Cetegen a Dong* [43], [25] identifikovány dva odlišné režimy nestabilit (oscilací) plamenů, tzv. varikózní režim a sinusový režim. Uvedené režimy se u difuzních plamenů uplatňují v závislosti na parametrech proudění paliva a obtékajícího vzduchu.

Varikózní režim nestability zahrnuje oscilace v blízkosti paty plamene (ústí hořáku), tj. osově symetrické kontrakce a expanze plamene. Tyto oscilace vedou k formování toroidních vírových struktur ve směru po proudu, tedy k vrcholu plamene. Vznikající vírové struktury vyvolávají kontrakce plamene po proudu. Vyhořívání paliva obsaženého ve vírových strukturách vede ke zřetelné oscilaci výšky plamene doprovázené periodickým odtrháváním („odskakováním“) vrcholku plamene. Průměrné výšky plamene

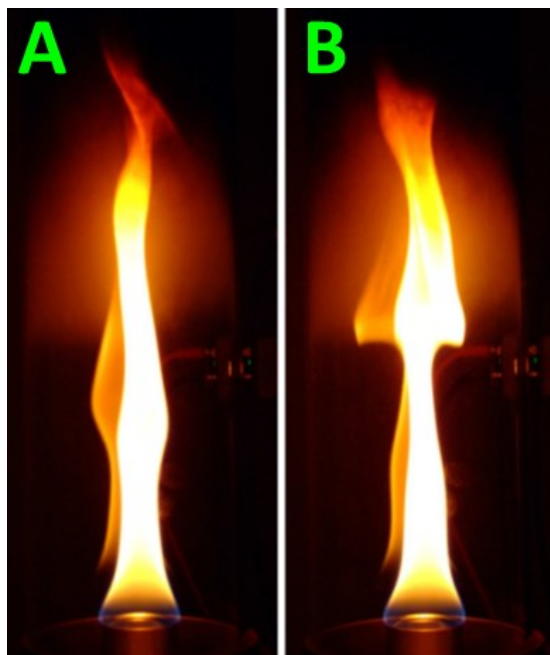
jsou ve varikózním režimu oscilace ve srovnání se sinusovým režimem oscilace plamene nižší.

Z varikózního režimu oscilace může plamen přecházet do oscilace v sinusovém režimu, při němž se oscilace v blízkosti paty plamene zastaví. Oscilace v sinusovém režimu se vyvíjí po proudu plamene, tj. od paty plamene k jeho vrcholku a dochází tak k rovnoměrným kontrakcím „obálky“ plamene. Tato oscilace vzniká podél celé osy plamene a uzavírá plamen do určité obálky, opticky se vlnící od paty až po špičku plamene. Vznikající oscilace jsou označovány jako oscilace sinusového typu. Deformace plamene jsou v případě sinusového režimu vyvolány vírovými prstenci, které jsou preferenčně vychylovány následkem sinusových nestabilit okolo své osy. Experimentálně bylo pozorováno *Cetegen a Dong* [43], *Bitala a kol.* [40], že plamen může přecházet z jednoho režimu oscilace do druhého a naopak. Chování spojené s přechodem režimů oscilace je zajímavým aspektem závislým na řadě parametrů a faktorů, zahrnující intenzitu vznášivého zrychlení na rozhraní proudu paliva a oxidačního prostředí (obálky plamene), a také míru a způsob, jakým je kontrolováno rušivé proudění v okolí plamene. Výše diskutované charakteristicky odlišné režimy oscilace plamene schematicky znázorňuje **Obrázek 9**.

Varikózní a sinusový režim oscilace plamene prezentuje rovněž **Obrázek 10**. Uvedený obrázek ilustruje oba režimy oscilace v případě plamene *n*-heptanu. Snímky varikózního a sinusového režimů oscilace zachycené na tomto obrázku byly pořízeny při měřeních v rámci předložené disertační práce.

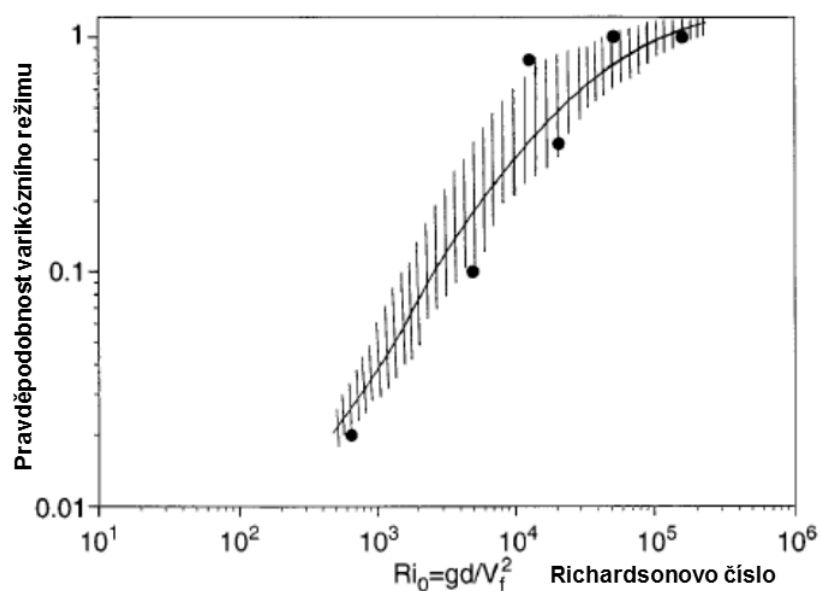


Obrázek 9: Schématické znázornění varikózního a sinusového režimu oscilace plamene



Obrázek 10: Sinusový (A) a varikózní (B) režim oscilace plamene n-heptanu

U diskutovaných režimů oscilací plamene bylo pozorováno, že se zvyšující se hodnotou „počátečního“ Richardsonova čísla Ri_0 se vlivem rostoucího významu vztlkových sil zvyšuje pravděpodobnost výskytu oscilace plamene ve varikózním režimu. Závislost pravděpodobnosti výskytu oscilace plamene ve varikózním režimu na hodnotě „počátečního“ Richardsonova čísla Ri_0 prezentuje **Obrázek 11** [43].



Obrázek 11: Pravděpodobnost varikózního režimu oscilace plamene jako funkce Richardsonova čísla

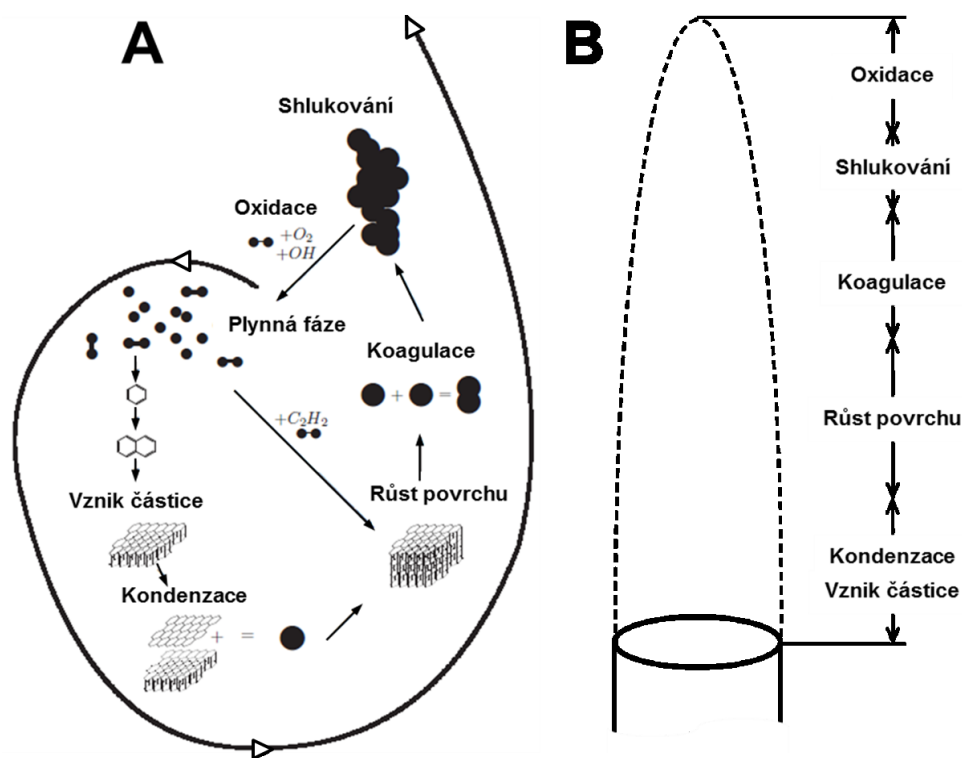
4.3.2 Teorie vzniku sazových částic

Saze jsou aglomerátem částic s proměnnou strukturou a velikostí [47]. Majoritní složkou sazí je uhlík a určité minoritní množství vodíku a kyslíku. V závislosti na okolním prostředí mohou saze na svém povrchu absorbovat rovněž další specie. I přesto, že již bylo identifikováno mnoho vlastností sazí, není vznik a formování sazí v celé své komplexnosti dosud zcela prozkoumán, a je proto často označován za nevyřešený problém v oblasti hoření. Otázkou chemie hoření a tvorby sazí zůstává především objasnění detailního mechanismu formování prvního a druhého aromatického kruhu a také chemických cest vzniku a polymerizace jednoduchých i polyaromatických uhlovodíků. Triviální, nicméně stále aktuální, je rovněž problém, jak jednoznačně definovat chemické složení sazí [45], [49].

Pro vznik a formování sazí je významná především oblast vrstvy paliva v plameni. Modely sazí dnes popisují proces vzniku a formování v sedmi následujících níže uvedených krocích [45]:

1. Reakce v plynné fázi: Prvním krokem při formování sazí je formování cyklických benzenových $c\text{-C}_6\text{H}_6$ a fenylových $c\text{-C}_6\text{H}_5$ řetězců v plynné fázi. Cyklické molekuly narostou do dvourozměrných polyaromatických uhlovodíků (PAH).
2. Vznik částic: Dvě dvourozměrné PAH se sloučí do jedné trojrozměrné částice.
3. Kondenzace: Částice rostou cestou kondenzace dvourozměrných v trojrozměrné PAH.
4. Zvětšování (růst) povrchu: Částice se zvětšují reakcí s plynnou fází. Pro růst sazových částic je důležitý hlavně acetylén (C_2H_2).
5. Koagulace: Spojí se dvě částice sazí.
6. Shlukování: Vytvářejí se velké skupiny částic sazí.
7. Oxidace: Sazové částice se volně koncentrují při reakcích s plynnou fází molekul O_2 a OH.

Schematicky je proces vzniku a formování sazí včetně popisu dominantních zdrojů tvorby v rozdílných oblastech v plameni znázorněn na **Obrázku 12** [45][48].



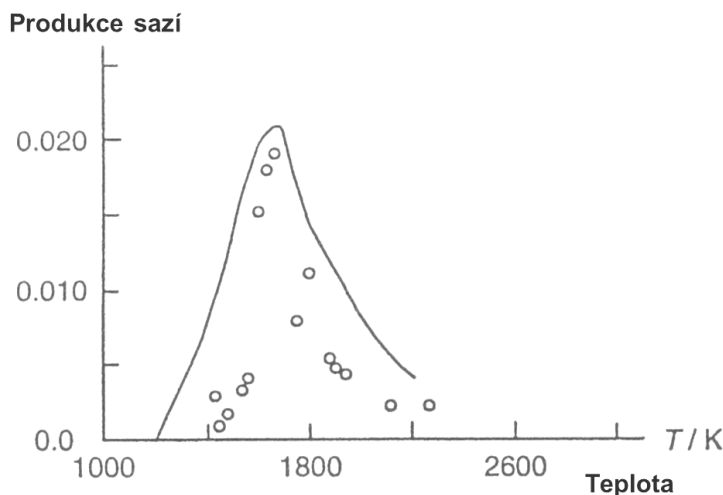
Obrázek 12: Schematické znázornění procesu tvorby sazí (A) a popis dominantních zdrojů tvorby sazí v rozdílných oblastech v plameni (B)

Množství vznikajících sazí v plameni je dáno složením hořlavé látky a také podmínkami hoření, jakými jsou například koncentrace oxidačního prostředí nebo teplota plamene. Zmiňované faktory spolu přitom úzce souvisí a navzájem se ovlivňují.

Jako příklad lze uvést závislost procesu tvorby sazí v plameni na teplotě, pro kterou je dle *Warnantze at al.* [26] příznačná tzv. „zvonová“ teplotní závislost, která je způsobena dle zmiňovaného autora níže uvedenými skutečnostmi:

1. Pro tvorbu sazí je potřeba radikálových prekurzorů (jakými jsou C_3H_3) a ty se v plameni při nízkých teplotách nevyskytují.
2. Sazové prekurzory jsou při vyšších teplotách v plameni pyrolýzovány a oxidovány, což limituje proces tvorby sazí v plameni na teplotní rozsah v rozmezí od 1000 K do 2000 K.

Závislost tvorby sazí v plameni na teplotě graficky prezentuje **Obrázek 13**. Tento obrázek znázorňuje typickou „zvonovou“ teplotní závislost produkce sazí v uvedené situaci u plamene prostorově homogenní směsi acetylénu, kyslíku a argonu ($C_2H_2-O_2-Ar$) [26] .



Obrázek 13: Teplotní závislost produkce sazí u plamene prostorově homogenní směsi acetylénu, kyslíku a argonu

Přítomnost i koncentrace sazí významně ovlivňuje hodnotu součinitele vyzařování plamene a tím i mechanismus přenosu tepla zářením. V situacích, kdy k tvorbě sazí v plameni nedochází nebo je jejich tvorba limitována (například teplotou), je barva plamene modrá a vzniká nesvítivý plamen. Pokud však k tvorbě sazí i jejich oxidaci v plameni dochází, je barva plamene žlutá až bílá a vzniká svítivý plamen. Barva plamene a mechanismus přenosu tepla zářením (intenzita vyzařování plamene, spektrální charakter) představují jedny z klíčových parametrů pro detekci požáru nebo jeho monitorování s využitím metod videodetekce požáru.

5 Experimentální část

V experimentální části disertační práce bylo v rámci řešení předmětné problematiky použito metody laboratorního experimentu. Cílem laboratorního experimentu bylo získat sérii původních dat, která by umožnila zhodnotit vliv aplikace vybraných hasicích látek, případně snížené koncentrace kyslíku v okolní atmosféře na parametry plamene využívané při detekci požáru. Experimenty byly primárně zaměřeny na ty aspekty, které jsou využívány při detekci požárů u praktických aplikací metod optické detekce plamene.

Naplnění stanoveného cíle experimentální části bylo podmíněno níže uvedenými skutečnostmi:

1. Návrhem a realizací experimentální sestavy vhodné pro fenomenologicky orientované měření parametrů plamene, které jsou významné z pohledu návrhu a testování metod optické detekce požárů (hlásiče vyzařování plamene, videodetekce požáru) v laboratorním měřítku.
2. Využitím experimentální sestavy pro sérii měření orientovaných na posouzení vlivu koncentrace vybraných hasicích látek pod hodnotou minimální hasicí koncentrace na frekvenci pulsace plamene (monitorování hydrodynamických nestabilit plamene).

Zvolená strategie byla prováděna se zřetelem k maximálnímu využití současných vědeckých poznatků a přístupů užívaných při studiích plamene, hasicích látek a jejich vzájemné interakce za přesně definovaných podmínek laboratorních experimentů. Orientace na laboratorní experimentální měření vycházela ze snahy o zajištění vysoké míry reprodukovatelnosti realizovaných měření a možnosti následného využití získaných poznatků pro validaci výsledků numerických simulací.

5.1 Požadavky na experimentální sestavu

V průběhu návrhu byly na experimentální sestavu formulovány následující požadavky:

1. Experimentální sestava musí umožňovat studium nepředmíseného plamene za přesně definovaných podmínek laboratorního experimentu.

2. Použitý fyzikální model (hořák) musí vycházet ze standardů užívaných ve vědecké komunitě orientující se na studium procesů hoření a hašení.
3. Použitý fyzikální model musí umožňovat použití různých typů paliv (plynných i kapalných).
4. Experimentální sestava musí umožňovat nezávislou kontinuální regulaci průtoku plyných médií (paliva, vzduchu a hasicí látky) a u kapalných paliv pak zaručovat konstantní rychlost odhořívání.
5. Experimentální sestava musí umožnit realizaci optických měření ve zvoleném pásmu vlnových délek.
6. Experimentální sestava musí eliminovat vliv okolního prostředí (proudění a přisávání okolního vzduchu) i vliv proudění směsi vzduchu a hasicí látky na strukturu plamene.

V případě sběru a zpracování dat byl definován požadavek tak, aby bylo možné provádět sběr a zápis dat s proměnným časovým rozlišením (proměnná frekvence vzorkování).

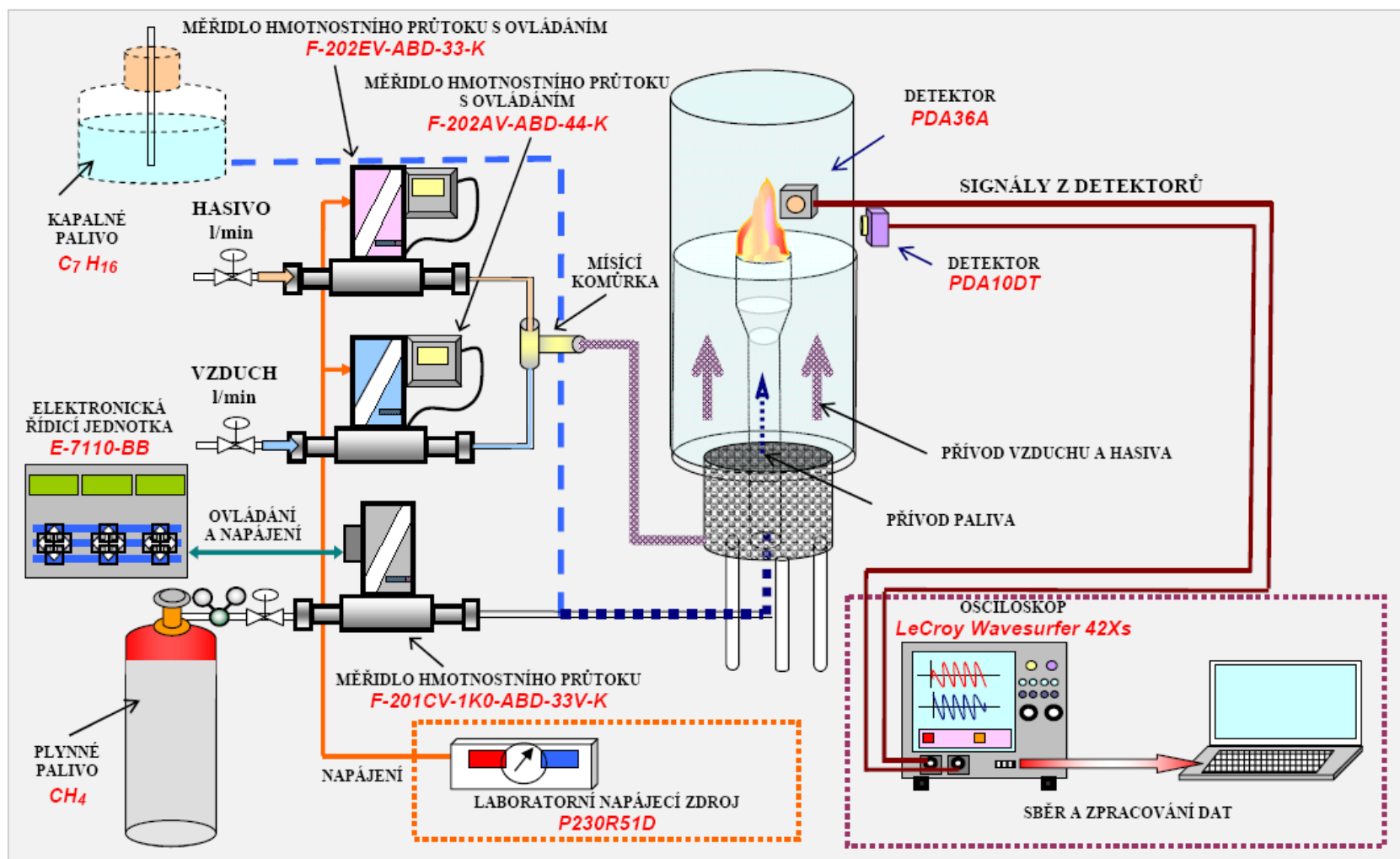
5.2 Experimentální sestava

Experimentální sestavu navrženou, realizovanou a využitou pro účely laboratorních měření lze rozdělit na tři základní části, a to následovně:

1. Modifikovaný pohárkový hořák, který v případě prováděných měření představoval fyzikální model požáru, poskytující nepředmísený (difuzní) plamen.
2. Systém přívodu paliva, vzduchu a hasicí látky umožňující přesnou regulaci průtoku všech zmiňovaných médií s možností jejich monitorování.
3. Systém snímání signálů z plamene a jeho kontinuální záznam s možností definovat frekvenci vzorkování signálu dle aktuální potřeby měření.

Při volbě a konstrukci jednotlivých částí experimentální sestavy bylo cílem zohlednit a zapracovat všechny dílčí požadavky, které byly na sestavu formulovány ve fázi jejího návrhu. Detailní popis jednotlivých částí je proveden v následujících kapitolách disertační práce. Principiální schéma navržené experimentální sestavy a její dílčí části znázorňuje **Obrázek 14**.

Při volbě pohárkového hořáku jako fyzikálního modelu požáru byla zohledněna především ta skutečnost, že ve srovnání s jinými typy hořáků, které jsou využívány při laboratorních studiích plamene a hašení (např. Henckenův hořák [4], Wolfhard – Parkerův [5], Protiproudý hořák [6], [7], Santorův hořák [3], Gülderův hořák [8] a McKennův hybridní hořák [9]), je u pohárkového hořáku vlivem relativně velkého průměru vyústění paliva indukováno nízkorychlostní pole proudění. Tato skutečnost implikuje nízké hodnoty Froudeho čísla a tím vyšší fyzikální podobnost jevů, které se uplatňují u modelového plamene pohárkového hořáku s jevy u plamenů reálných požárů. Další velmi důležitou skutečností je rovněž to, že pohárkový hořák je základem standardizovaných metodik ISO 14 520 – 1 [1] a NFPA 2001[2], které jsou používány pro stanovení minimální koncentrace plyných hasicích látek pro uhašení plamene. U zmiňovaných standardizovaných normativních předpisů je hasicí schopnost posuzována na základě hodnoty MEC (Minimum Extinguishing Concentration) plyných hasicích látek. Minimální hasicí koncentrace (MEC) prezentuje nejnižší koncentraci hasicí látky ve vzduchu, která za podmínek zkoušky způsobí uhašení zkušebního plamene. MEC hodnota je základní výkonnostní charakteristikou hasicí schopnosti všech plyných hasicích látek. Z pohledu praktického využití je hodnota MEC jedním z nejdůležitějších parametrů, který ovlivňuje návrh plynových stabilních hasicích zařízení při stanovení hodnoty projektové hasicí koncentrace pro danou aplikaci, a tím i definování potřebné zásoby hasicí látky. Projektová hasicí koncentrace je u praktických aplikací plynových stabilních hasicích zařízení odvozena z hodnoty MEC hasicí látky jako její 1,3 násobek.



Obrázek 14: Schéma experimentální sestavy

5.2.1 Modifikovaný pohárkový hořák

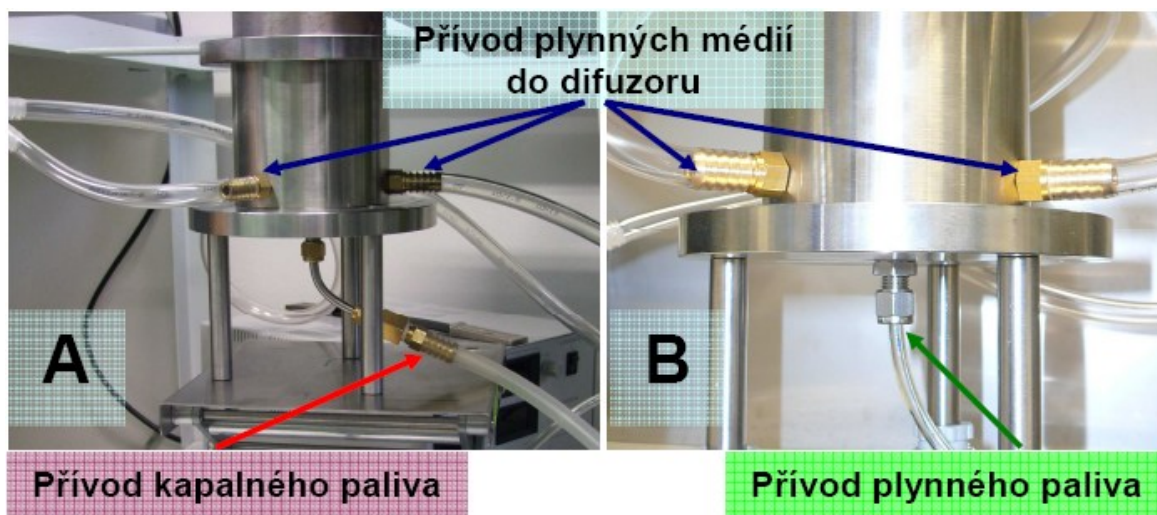
Konstrukce pohárkového hořáku vychází rozměrově ze specifik a požadavků definovaných standardy ISO 14 520 – 1 a NFPA 2001. S ohledem na účel použití pohárkového hořáku v případě experimentálního měření byla konstrukce dle ISO 14 520 – 1 navíc autorem disertační práce doplněna o možnost využití plynného paliva. Způsoby realizace přívodu plynného a kapalného paliva jsou podrobněji popsány v následujícím textu práce.

Přívod plynného paliva do pohárkového hořáku

Plynné palivo bylo k pohárkovému hořáku přivedeno prostřednictvím polyetylenové hadičky s vnitřním průměrem 4 mm a vnějším průměrem 6 mm. Zaústění přívodu paliva do pohárkového hořáku bylo realizováno s využitím nerezové průchodky instalované ve vertikální ose hořáku. Nerezová průchodka byla na straně přívodu paliva opatřena závitem a nerezovou standardizovanou spojkou (Swagelok). Použitá spojka umožnila přímé napojení polyetylenové hadičky k hořáku. Způsob realizace přívodu plynného paliva do pohárkového hořáku zachycuje **Obrázek 15 B**.

Přívod kapalného paliva do pohárkového hořáku

Kapalné palivo bylo k pohárkovému hořáku přivedeno ze zásobní skleněné láhve se spodní výpustí prostřednictvím silikonové hadičky s vnitřním průměrem 8 mm a vnějším průměrem 12 mm. Zaústění přívodu kapalného paliva do pohárkového hořáku bylo provedeno stejným způsobem jako u paliva plynného, a to prostřednictvím nerezové průchodky. Ve srovnání se způsobem realizace přívodu plynného paliva byl však u kapalného paliva použit rozdílný způsob v napojení přívodu paliva na nerezovou průchodku. Napojení přívodu kapalného paliva na nerezovou průchodku bylo řešeno s využitím nerezové trubičky s vnitřním průměrem 4 mm a vnějším průměrem 6 mm. Nerezová trubička byla na straně hořáku opatřena standardizovanou mosaznou spojkou (Swagelok), na straně paliva pak opatřena mosazným přechodem s vnitřním závitem (Swagelok) na hadicový násadec a hadicovým násadcem se šestihranem a vnějším závitem. Takto realizovaný způsob připojení umožnil přímé napojení silikonové hadičky k pohárkovému hořáku. Způsob řešení přívodu kapalného paliva do pohárkového hořáku prezentuje **Obrázek 15 A**.



Obrázek 15: Způsob realizace přívodu paliva a plyných médií do difuzoru

Přívod paliva do pohárku pohárkového hořáku

Přívod paliva do pohárku byl realizován trubkou z nerezové oceli. Nerezová trubka byla na straně přívodu paliva nalisována na nerezovou průchodku a na straně pohárku opatřena osazením, které umožňovalo instalaci vyměnitelného pohárku. Vzájemné utěsnění pohárku a nerezové trubky bylo provedeno teflonovou těsnicí páskou. Rozebíratelný způsob konstrukce byl volen především z důvodu požadované obměny pohárku při měřeních u jednotlivých typů paliv. Způsob realizace přívodu paliva do pohárku znázorňuje **Obrázek 16 A**.

Konstrukce pohárku

Pro měření s kapalným palivem byl použit pohárek vyrobený z nerezové oceli. Využití nerezové oceli pro konstrukci pohárku u kapalného paliva ovlivnila především ta skutečnost, že se u konstrukce pohárku z běžné oceli, která byla použita v průběhu testování hořáku, projevila místní povrchová koroze pohárku. Vlivem vzniklé koroze následně docházelo k znečištění paliva. Konstrukci pohárku pro kapalně palivo ilustruje **Obrázek 16 B**.

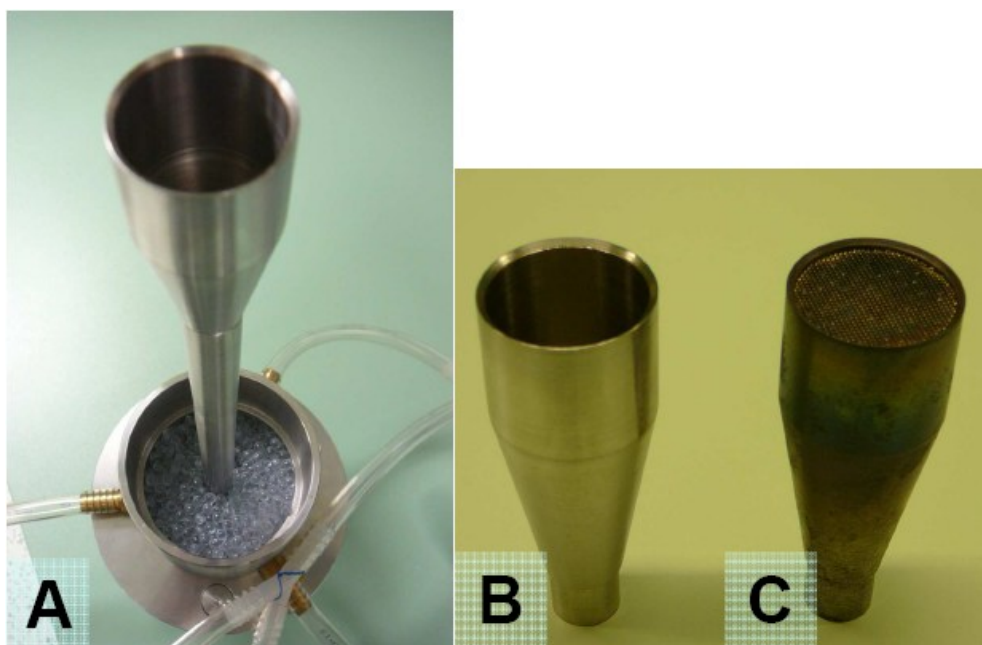
Pro plyné palivo byl použit ocelový pohárek. Tento pohárek byl navíc ve srovnání s pohárkem pro kapalně palivo vyplněn skleněnými kuličkami o průměru 3 mm shora překrytými nerezovým sítem s velikostí oka 0,4 mm a průměrem osnovního drátu 0,22 mm. Konstrukce pohárku pro plyné palivo byla uvedeným způsobem řešena

z důvodu zajištění rovnoměrného („*top hat*“) profilu proudění plynu pohárkem. Konstrukci pohárku pro plynné palivo znázorňuje **Obrázek 16 C**.

Konstrukce difuzoru pohárkového hořáku

S ohledem na charakter prováděných měření bylo při konstrukci difuzoru pohárkového hořáku snahou zajistit prostorově rovnoměrné a pokud možno laminární proudění homogenní směsi vzduchu a hasicí látky při obtékání plamene. Tato skutečnost vedla autora disertační práce k provedení modifikace v konstrukčním řešení způsobu přívodu plynných médií do difuzoru pohárkového hořáku. Přívod plynných médií do difuzoru byl ve srovnání se standardy ISO 14 520 – 1 a NFPA 2001 modifikován a řešen prostřednictvím 3 kusů mosazných hadicových násadců s vnějším závitem. Hadicové násadce byly do difuzoru zaústěny ve výšce 10 mm od spodní hrany difuzoru s roztečí 120°. Způsob, jakým byl řešen přívod plynných médií do difuzoru, je zaznamenán na **Obrázku 15**.

Difuzor byl v souladu s ISO 14 520 – 1 a NFPA 2001 vyplněn vrstvou skleněných kuliček o průměru 6 mm (výška vrstvy 25 mm), které byly položeny na vrstvě drátěného síta z nerezové oceli s velikostí oka 0,3 mm a průměrem osnovního drátu 0,22 mm, viz **Obrázek 16 A**.



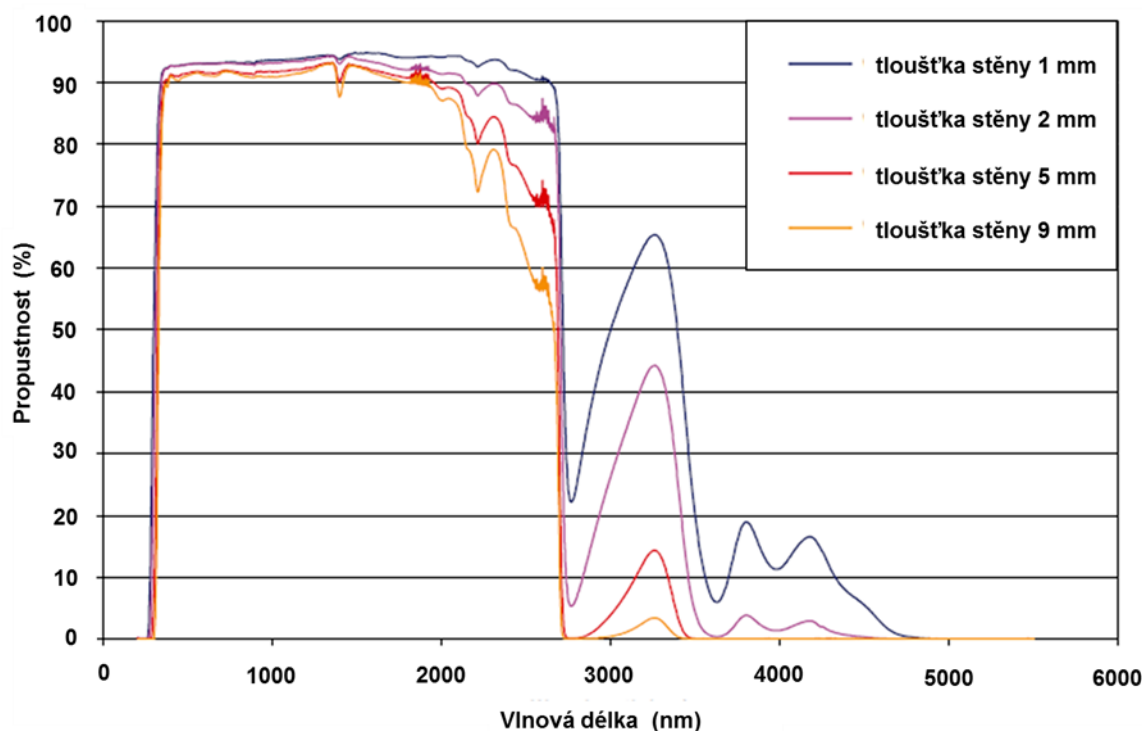
Obrázek 16: Detail konstrukce difuzoru a konstrukce pohárků

Konstrukce komínku pohárkového hořáku

Pro eliminaci vlivu okolního prostředí byl v souladu s konstrukcí dle ISO 14 520 – 1 využit komínek z křemenného skla („*Quartz chimney*“) s vnitřním průměrem 85 mm, výšky 530 mm a tloušťkou stěny 2 mm. Skleněný komínek byl ze SIMAX skla. Hlavní složky SIMAX skla a jejich procentuální hmotnostní podíl uvádí **Tabulka 1**. **Obrázek 17** znázorňuje křivky spektrální propustnosti SIMAX skla v závislosti na tloušťce stěny [10].

Tabulka 1: Složky SIMAX skla dle procentuálního hmotnostního podílu.

Složky	SiO ₂	B ₂ O ₃	Na ₂ O + K ₂ O	Al ₂ O ₃
Hmotnostní podíl [%]	80,6	13	4	2,4



Obrázek 17: Charakteristika spektrální propustnosti SIMAX skla pro různé tloušťky stěny

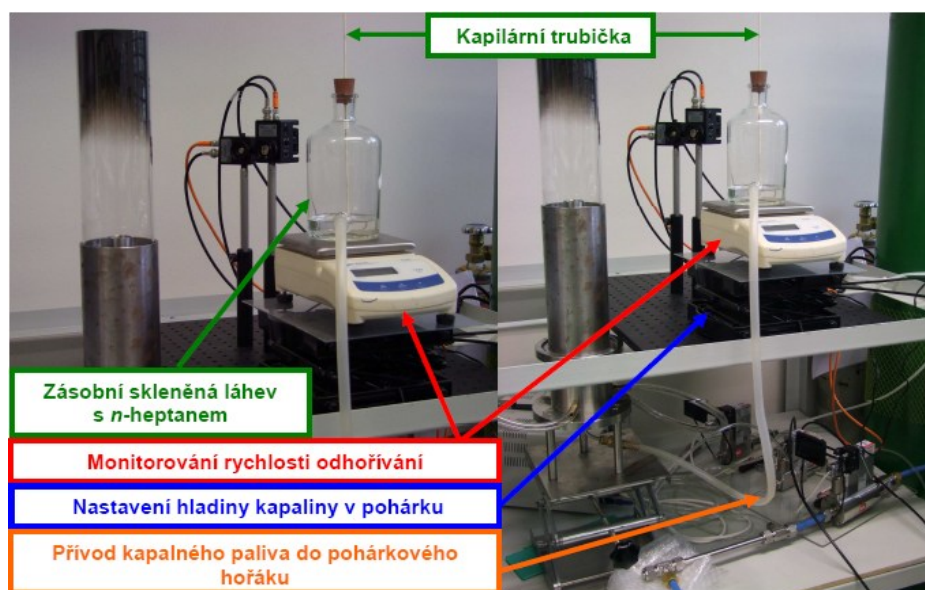
Konstrukční výkres celé sestavy modifikovaného pohárkového hořáku je prezentován na **Obrázku C1**, který lze nalézt v **Příloze C** disertační práce.

5.2.2 Systém přívodu médií

Systém přívodu médií lze v případě experimentální sestavy rozdělit na systém přívodu kapalného paliva, systém přívodu plynného paliva a systém přívodu směsi plyných médií do difuzoru pohárkového hořáku. Způsoby řešení uvedených systémů i realizace regulace průtoku medií jsou popsány v následujícím textu.

Přívod kapalného paliva

Kapalné palivo bylo přivedeno ze zásobní skleněné láhve se spodní výpustí prostřednictvím silikonové hadičky. K udržování konstantní výšky hladiny hořlavé kapaliny v pohárku (eliminace vlivu odhořívání paliva) bylo využito principu Mariottovy nádoby. Horní hrdlo zásobní láhve s hořlavou kapalinou bylo opatřeno gumovou zátkou, do které byla utěsněným otvorem vsazena kapilární trubička (vnitřní průměr $\sim 0,2$ mm) ponořená spodním koncem pod hladinu kapaliny. Zásobní skleněná láhev byla umístěna na vertikálně polohovatelném stojanu, který umožňoval nastavení požadované výšky hladiny hořlavé kapaliny v pohárku. Volbou vhodného množství kapaliny v zásobní skleněné láhvi a její polohy (výšky) bylo možné docílit rovnovážného stavu, tedy ustálení hladiny hořlavé kapaliny v pohárku v průběhu celého experimentálního měření. Pro monitorování hmotnosti kapaliny (rychlosti odhořívání kapaliny) byla zásobní láhev umístěná na laboratorní váze PK – 4801 (Denver instrument). Způsob realizace dodávky kapalného paliva je vyobrazen na **Obrázku 18**.



Obrázek 18: Způsob realizace přívodu kapalného paliva

Přívod plynného paliva

Přívod plynného paliva (metanu) byl realizován s využitím tlakových polyetylénových hadiček. Pro vzájemné propojení jednotlivých prvků přívodu paliva bylo použito standardizovaných spojek „Swagelok“. Palivo bylo přiváděno z tlakové láhve přes redukční ventil (Concoa 302), který byl na výstupní straně opatřen kulovým uzavíracím ventilem (Swagelok). Pro regulaci průtoku plynného paliva bylo použito měřidlo hmotnostního průtoku F-201CV-1K0-ABD-33-V (Bronkhorst EL – FLOW) s regulační funkcí a regulačním přímo ovládaným ventilem (MFC). Nominální přesnost použitého měřidla hmotnostního průtoku byla dle kalibračního protokolu $\pm (0,8 \% \text{ odečtu} + 0,2 \% \text{ celkového rozsahu})$. Měřidlo hmotnostního průtoku bylo kalibrováno pro maximální hodnotu průtoku $1000 \text{ ml}_n/\text{min}$ vzduchu (AIR). K napájení a ovládání měřidla hmotnostního průtoku byla využita digitální programovatelná elektronická napájecí a řídicí jednotka Bronkhorst typu E-7110-BB, vybavena R/C modulem řízení průtoku plynu.

Přívod směsi plynných médií do difuzoru pohárkového hořáku

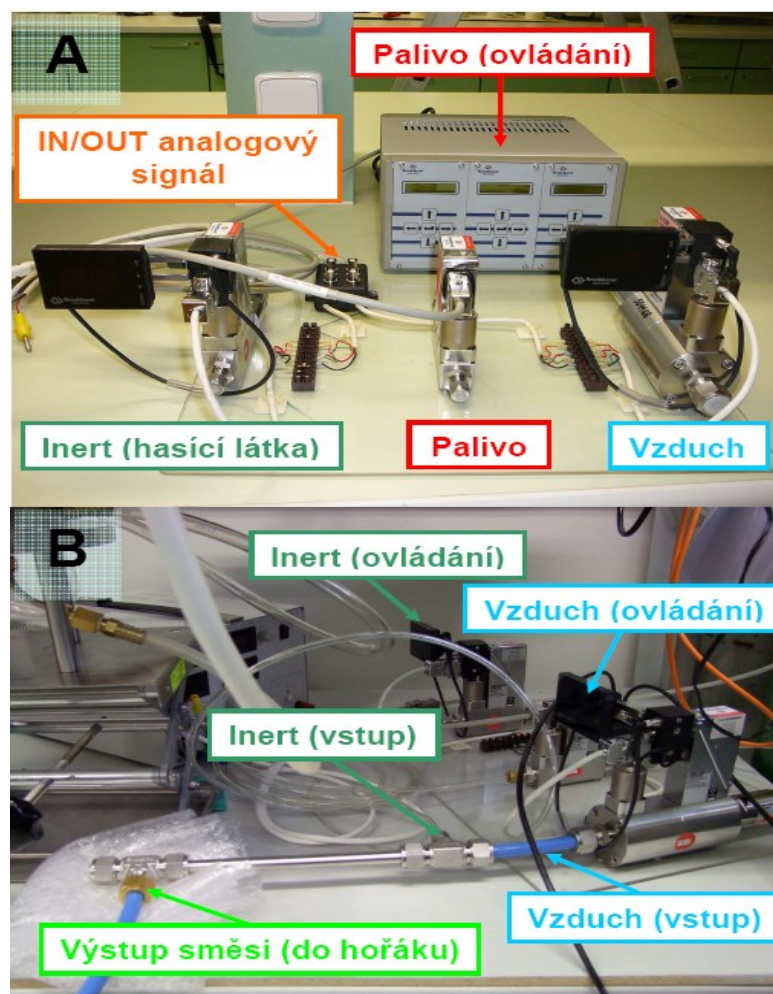
Pro vytvoření směsi (vzduchu a hasicí látky), která byla přivedena přes mísící komůrku do difuzoru, byl použit vzduch z centrálního rozvodu tlakového vzduchu laboratoře LC 116 Fakulty bezpečnostního inženýrství (vysušený, filtrovaný) a hasicí látka v podobě N_2 , CO_2 a Ar. Všechny použité hasicí látky byly přivedeny z tlakových lahví.

K regulaci průtoku vzduchu bylo použito měřidlo hmotnostního průtoku F-202AV-M10-ABD-44V (Bronkhorst EL – FLOW) s regulační funkcí a regulačním pilotně ovládaným ventilem (MFC). Nominální přesnost měřidla hmotnostního průtoku byla dle kalibračního protokolu $\pm (0,8 \% \text{ odečtu} + 0,2 \% \text{ celkového rozsahu})$. Měřidlo hmotnostního průtoku bylo kalibrováno pro maximální hodnotu průtoku $100 \text{ l}_n/\text{min}$ vzduchu (AIR). K ovládání měřidla hmotnostního průtoku vzduchu byl použit R/C řídicí a monitorovací panel Bright typ B1 (Bronkhorst). Napájení měřidla hmotnostního průtoku bylo realizováno s využitím laboratorního zdroje DIAMETRAL, typ P230R51D. Přívod vzduchu do ventilu a z ventilu (do mísící komůrky) byl proveden s využitím tlakové polyamidové hadičky s vnitřním průměrem 10 mm a vnějším průměrem 12 mm.

Přívod hasicí látky z tlakové láhve i její odvod do mísící komůrky byl proveden s využitím tlakových polyetylénových hadiček s vnitřním průměrem 4 mm a vnějším průměrem 6 mm. Hasicí látka byla přivedena z tlakové lahve přes redukční ventil (WIKA).

K regulaci průtoku hasicí látky bylo použito měřidlo hmotnostního průtoku F-202EV-ABD-33-K (Bronkhorst ΔP – FLOW) pro speciální plyny s regulační funkcí a regulačním přímo ovládaným ventilem (MFC). Nominální přesnost měřidla hmotnostního průtoku byla dle kalibračního protokolu $\pm (0,8 \% \text{ odečtu} + 0,2 \% \text{ celkového rozsahu})$. Měřidlo hmotnostního průtoku bylo kalibrováno pro maximální hodnotu průtoku 25 l_n/min dusíku (N₂). Pro ovládání měřidla hmotnostního průtoku hasicí látky byl použit R/C řídicí a monitorovací panel Bright typ B1 (Bronkhorst). Napájení měřidla hmotnostního průtoku bylo realizované s využitím laboratorního zdroje DIAMETRAL, typ P230R51D. Pro spojení prvků systému přívodu a regulace vzduchu i hasicí látky bylo použito standardizovaných spojek „Swagelok“.

Směs vzduchu a hasicí látky o požadované koncentraci byla vytvořena v mísící komůrce, do které byla plynná média přivedena z výstupů měřidel hmotnostního průtoku vzduchu a hasicí látky. Mísící komůrka byla tvořena dvojicí T – šroubení „Swagelok“ (SS-12M0-3-12M-6M, SS-12M0-3), mezi které byla umístěna nerezová trubka (délka 200 mm, vnitřní průměr 9 mm, vnější průměr 12 mm). Pro vytvoření homogenní směsi hasicí látky a vzduchu byla mísící komůrka vyplněna vrstvou skleněných kuliček o průměru 6 mm. Na výstupní straně byla komůrka opatřena nerezovým sítkem o průměru 13 mm (velikost oka 0,4 mm, průměr osnovního drátu 0,22 mm). Odvod směsi vzduchu a hasicí látky byl z mísící komůrky realizován polyamidovou hadičkou (vnitřní průměr 10 mm, vnější průměr 12 mm). Před vstupem do difuzoru bylo vedení směsi rozděleno prostřednictvím dvou kusů polyetylenových spojek do tří větví s napojením na polyetylenové hadičky o vnitřním průměru 10 mm, kterými byla směs přivedena přes hadicové násadce do difuzoru pohárkového hořáku. Způsob realizace přívodu a regulace médií (vzduch, hasicí látka, plynné palivo, směs) znázorňuje **Obrázek 19**.



Obrázek 19: Ilustrativní fotografie zapojení a instalace hmotnostních průtokoměrů (A) a systému směšování a přívodu plyných médií do hořáku (B).

Návrh a realizace způsobu přívodu médií včetně systému napájení, řízení a vytváření směsi vzduchu s hasící látkou je dílem autora disertační práce. Z pohledu konstrukčního provedení byla měřidla hmotnostního průtoku instalována na polymethylmetakrylátové desce (délky 400 mm, šířky 310 mm, tloušťky 4 mm). U měřidel hmotnostního průtoku vzduchu i hasící látky byla konstrukce systému přívodu a regulace průtoku plyných médií navíc doplněna o analogové vstupní a výstupní rozhraní s možností řízení průtoku i jeho sledování prostřednictvím analogového signálu (0 – 10 V). Pro realizaci vstupních a výstupních svorek analogového rozhraní byly použity čtyři kusy panelových BNC konektorů, viz **Obrázek 19 A**.

5.2.3 Systém snímání signálů

Pro snímání signálů z plamene pohárkového hořáku bylo při experimentálním měření použito dvou typů fotodetektorů, a to PDA 10DT – EC a PDA 36A – EC.

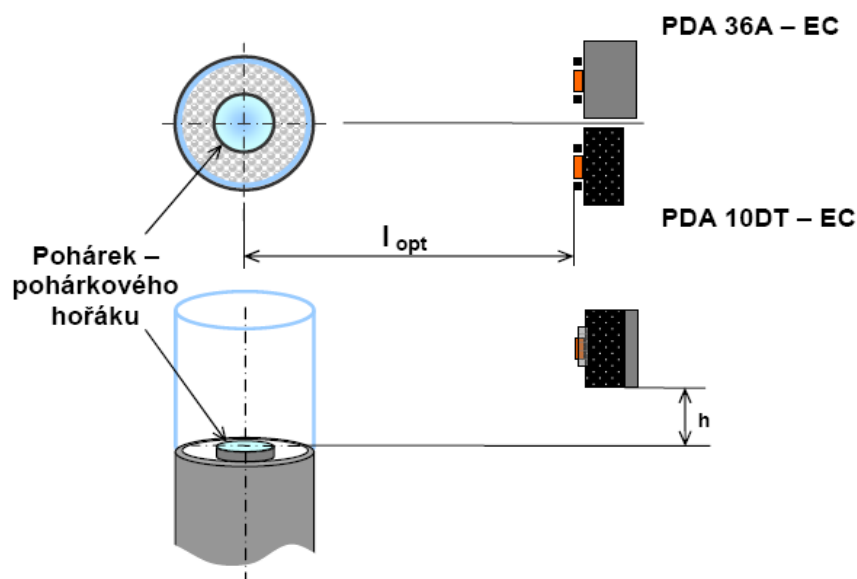
Fotodetektor PDA 10DT – EC (Thorlabs) je chlazený InGaAs fotodetektor s integrovaným předzesilovačem, nastavitelnou úrovní zisku a šířkou frekvenčního pásma. Umožňuje detekci záření v rozsahu vlnových délek 1200 – 2570 nm. Fotodetektor je charakteristický nízkým šumem, malým temným proudem a vysokou rychlostí odezvy [13].

Fotodetektor PDA 36A – EC (Thorlabs) je chlazený Si fotodetektor s integrovaným předzesilovačem a nastavitelnou úrovní zisku. Umožňuje detekci záření v rozsahu vlnových délek 350 – 1100 nm [14].

Křivky spektrální citlivosti použitých fotodetektorů prezentuje **Obrázek D 1**, který lze nalézt v **Příloze D** disertační práce. Výběr fotodetektorů byl z pohledu spektrální citlivosti limitován především spektrální propustností skla použitého skleněného komínku (sklo SIMAX). Skleněný komínek tvoří nedílnou součást konstrukce pohárkového hořáku a slouží pro eliminaci vlivu okolního prostředí na plamen i složení směsi vzduchu a hasicí látky přiváděné do obtoku pohárku.

Pro nastavení polohy fotodetektorů bylo při experimentálních měřeních použito vertikálně polohovaných držáků optických prvků, které byly umístěny na hliníkové optické desce MB4560/M (Thorlabs). Optické uspořádání a polohu fotodetektorů znázorňuje **Obrázek 20**. Detailní hodnoty vertikální a horizontální pozice fotodetektorů při prováděných měřeních uvádí **Tabulka 2**. Rozdílnost pozice fotodetektorů při experimentálním měření s *n*-heptanem ovlivnily především úroveň intenzity vyzařování plamene a jeho výška. Při testovacích měřeních s plamenem *n*-heptanu docházelo při nižších horizontálních vzdálenostech detektorů k saturaci detektorů a naměřená data tak neumožnila správnou interpretaci.

Pro napájení fotodetektorů elektrickou energií byly při prováděných experimentálních měřeních použity napájecí zdroje AD-9639 (GlobTek). Použité napájecí zdroje byly pro oba typy fotodetektorů dodány přímo výrobcem fotodetektorů.



Obrázek 20: Optické uspořádání fotodetektorů

Snímání signálů z fotodetektorů bylo prováděno prostřednictvím paměťového osciloskopu LeCroy model Wavesurfer 42Xs. Vzájemné propojení fotodetektorů a osciloskopu bylo realizováno stíněným koaxiálním kabelem s BNC konektory s impedancí $50\ \Omega$. Použitý způsob umožňoval provádět nezávislý sběr i zápis dat z obou fotodetektorů s proměnným časovým rozlišením (proměnná frekvence vzorkování). Osciloskop LeCroy nabízel rovněž možnost volby formátu uložených dat. Data uložená v paměti osciloskopu bylo možné přes USB rozhraní exportovat na přenosný USB disk a použít pro zpracování v PC. Frekvence vzorkování signálů z fotodetektorů byla při prováděných měřeních u obou fotodetektorů $500\ \text{Hz}$ (časová perioda $0,002\ \text{s}$) a doba záznamu $20\ \text{s}$. Data z měření byla ukládána ve formátu txt v podobě ASCII tabulky (čas, hodnota). Využitý formát poskytoval možnost následného snadného importu dat do libovolného tabulkového procesoru.

Tabulka 2: Horizontální a vertikální pozice fotodetektorů

			PDA 10DT - EC		PDA 36A - EC	
			Horizontální pozice fotodetektoru	Vertikální pozice fotodetektoru	Horizontální pozice fotodetektoru	Vertikální pozice fotodetektoru
			l_{opt} [mm]	h [mm]	l_{opt} [mm]	h [mm]
Měření						
$C_7H_{16}q_1$			600	200	600	200
$C_7H_{16}q_1MEC30N_2$	$C_7H_{16}q_1MEC60N_2$	$C_7H_{16}q_1MEC90N_2$	400	200	400	200
$C_7H_{16}q_1MEC30CO_2$	$C_7H_{16}q_1MEC60CO_2$	$C_7H_{16}q_1MEC90CO_2$	400	200	400	200
$C_7H_{16}q_1MEC30Ar$	$C_7H_{16}q_1MEC60Ar$	$C_7H_{16}q_1MEC90Ar$	400	200	400	200
$CH_4v_1q_1$	$CH_4v_2q_1$	$CH_4v_3q_1$	62	120	62	120
$CH_4v_1q_1MEC30N_2$	$CH_4v_2q_1MEC30N_2$	$CH_4v_3q_1MEC30N_2$	62	120	62	120
$CH_4v_1q_1MEC60N_2$	$CH_4v_2q_1MEC60N_2$	$CH_4v_3q_1MEC60N_2$	62	120	62	120
$CH_4v_1q_1MEC90N_2$	$CH_4v_2q_1MEC90N_2$	$CH_4v_3q_1MEC90N_2$	62	120	62	120
$CH_4v_1q_1MEC30CO_2$	$CH_4v_2q_1MEC30CO_2$	$CH_4v_3q_1MEC30CO_2$	62	120	62	120
$CH_4v_1q_1MEC60CO_2$	$CH_4v_2q_1MEC60CO_2$	$CH_4v_3q_1MEC60CO_2$	62	120	62	120
$CH_4v_1q_1MEC90CO_2$	$CH_4v_2q_1MEC90CO_2$	$CH_4v_3q_1MEC90CO_2$	62	120	62	120
$CH_4v_1q_1MEC30Ar$	$CH_4v_2q_1MEC30Ar$	$CH_4v_3q_1MEC30Ar$	62	120	62	120
$CH_4v_1q_1MEC60Ar$	$CH_4v_2q_1MEC60Ar$	$CH_4v_3q_1MEC60Ar$	62	120	62	120
$CH_4v_1q_1MEC90Ar$	$CH_4v_2q_1MEC90Ar$	$CH_4v_3q_1MEC90Ar$	62	120	62	120

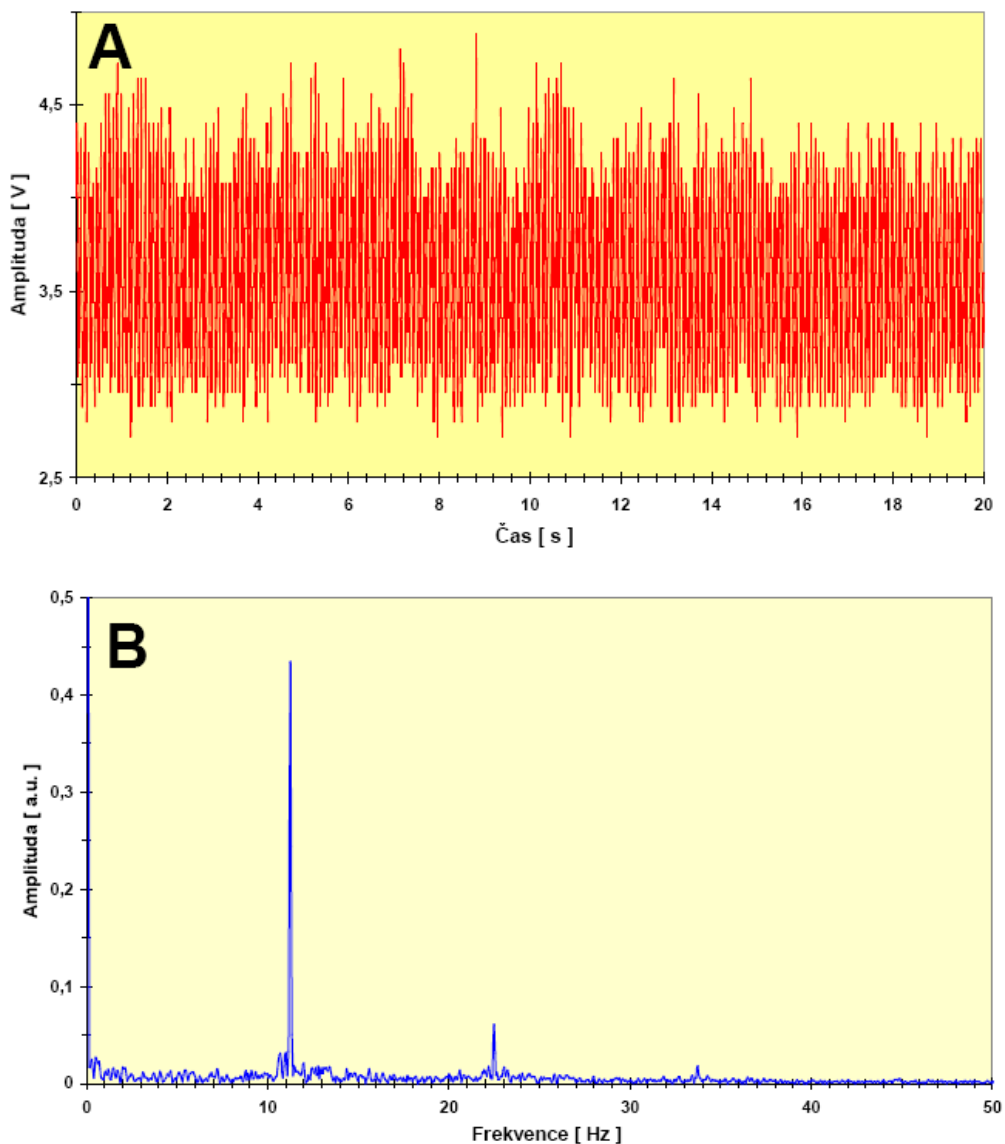
5.3 Zpracování dat

Pro zpracování dat získaných v průběhu experimentálního měření bylo použito software OriginPro. Softwarové prostředí OriginPro umožnilo přímý import získaných dat i jejich následné zpracování. Data byla importována z USB disku, na kterém byla uložena z paměti osciloskopu LeCroy. Získaná data z jednotlivých měření prezentovala vývoj okamžité hodnoty amplitudy signálu z obou fotodetektorů v čase.

Data byla zpracována s využitím frekvenční analýzy pomocí Rychlé Fourierovy transformace (FFT – Fast Fourier Transformation). Provedená analýza umožnila z naměřených dat získat informaci o frekvenci oscilace plamene a její amplitudě v závislosti na složení směsi v obtoku pohárkového hořáku, v tomto případě v daném rozsahu vlnových délek za podmínek experimentálního měření.

Způsob zpracování signálu s využitím frekvenční analýzy pomocí Rychlé Fourierovy transformace znázorňuje **Obrázek 21**. **Obrázek 21 A** prezentuje analogový signál (amplitudová charakteristika) z InGaAs detektoru PDA10DT-EC (1200 – 2570 nm) získaný při měření plamene *n*-heptanu. U uvedeného obrázku jde o volné odhořívání *n*-heptanu v pohárku hořáku při objemovém průtoku vzduchu v obtoku pohárkového hořáku 40 l·min⁻¹. Vzduch byl čistý bez přídavku hasicí látky (C₇H₁₆q₁). Zisk fotodetektoru byl u tohoto měření nastaven na hodnotu 40 dB a dolnofrekvenční propust na hodnotu 5 kHz. **Obrázek 21 B** zobrazuje analyzovaný signál (amplitudová frekvenční charakteristika) po frekvenční analýze s využitím Rychlé Fourierovy transformace (FFT).

Z obrázku je po provedené frekvenční analýze signálu dobře patrná pravidelná oscilace plamene na frekvenci kolem 11 Hz (11,25 Hz). Tato frekvence představuje tzv. základní (hlavní) frekvenci oscilace plamene. Dobře identifikovatelné jsou zde rovněž harmonické frekvence, jejichž frekvence, vyjádřena v jednotkách Hertz, je celočíselným násobkem základní frekvence. V uváděném případě první harmonická frekvence o hodnotě kolem 22 Hz (22,5 Hz) a druhá harmonická o hodnotě kolem 33 Hz (33,75 Hz).



Obrázek 21: Způsob zpracování signálu s využitím frekvenční analýzy signálu

5.4 Použité látky

Při experimentálním měření bylo jako kapalného paliva použito *n*-heptanu a jako plynného paliva metanu. Výběr použitých paliv vycházel z požadavků na typy paliv, které jsou vyžívány v případě standardizovaných metodik ISO 14 520 – 1 a NFPA 2001. Nominální čistota použitého metanu byla 99,95 % (SIAD). Čistota metanu byla plně ve shodě s požadavkem na čistotu „plynného referenčního paliva“, který je definován standardem NFPA 2001 (metan s minimální čistotou 99 %). Nominální čistota *n*-heptanu byla p.a. (PENTA). Rovněž v tomto případě byla čistota použitého paliva ve shodě

s požadavkem, který je definován na „kapalné referenční palivo“ dle normy ISO 14 520-1 a standardu NFPA 2001 (*n*-heptan s minimální čistotou 99 %).

Vzhledem ke skutečnosti, že v případě laboratorního měření byly použity standardní typy paliv, bylo možné při prováděných měřeních odvodit požadované procentuální hodnoty koncentrací hasicích látek z již stanovených hodnot MEC hasicích látek. Při experimentálním měření s metanem byly hodnoty 30 %, 60 % a 90 % minimální hasicí koncentrace hasicích látek (N₂, CO₂, Ar) odvozeny od experimentálně stanovených hodnot MEC hasicích látek dle *Takahashi et al.* [16]. Pro měření s *n* – heptanem byly výše uvedené procentuální hodnoty odvozeny od experimentálně stanovených hodnot MEC hasicích látek dle *Senecal* [17]. Hodnoty experimentálně stanovených minimálních hasicích koncentrací použitých hasicích látek dle citovaných prací uvádí **Tabulka 3** [16], [17].

Tabulka 3: Minimální hasicí koncentrace použitých plynných hasicích látek

Palivo	Hasicí látka		Minimální hasicí koncentrace [% obj.]
	Označení	Chemický vzorec	
Metan	Dusík	N ₂	25,9 ± 0,6
	Argon	Ar	37,2 ± 1,5
	Oxid uhličitý	CO ₂	15,7 ± 0,6
<i>n</i> - heptan	Dusík	N ₂	31,9
	Argon	Ar	42,5
	Oxid uhličitý	CO ₂	20,9

Při měřeních byly jako plynné hasicí látky použity plyny s níže uvedenou čistotou:

1. Dusík s nominální čistotou 99,999 % (SIAD).
2. Oxid uhličitý s nominální čistotou 99,5 % (SIAD).
3. Argon s nominální čistotou 99,999 % (SIAD).

Výběr plynných látek zohledňoval z praktického hlediska především následující skutečnosti:

1. Všechny použité plynné látky jsou v současnosti využívány jako hasicí látky u plynových stabilních hasicích zařízení.

2. Všechny použité plynné látky se při praktických aplikacích využívají v podobě chemicky čisté i jako součást tzv. směsných hasicích látek, například INERGEN (52 %N₂+40 %Ar+8 %CO₂) nebo ARGONITE (50 %Ar+50 %N₂) [18].
3. Všechny použité plynné látky mají z pohledu využití v požární praxi shodný mechanismus hašení.
4. Žádná z použitých plyných látek nezpůsobuje narušování ozónové vrstvy, a jejich použití v požární praxi tudíž není v současné době časově omezeno.

Velmi podstatnou skutečností ve vztahu k charakteru prováděných měření a použitých plyných látek je rovněž nově uplatňovaný způsob realizace preventivních opatření proti vzniku a šíření požáru označovaný jako *OxyReduct* [19]. Zmiňovaný způsob preventivních opatření je založen na snižování koncentrace kyslíku v chráněném objektu nebo jeho části. Uplatnění nachází především v objektech muzeí a knihoven. Pro snižování koncentrace kyslíku se v případě praktických aplikací využívá substituce kyslíku s použitím dusíku. Koncentrace kyslíku se v chráněném objektu nebo jeho části snižuje až na hodnotu okolo 15 % obj.

5.5 Podpurné snímkování plamene

Pro podporu vyhodnocování experimentálních měření byly pořizovány sekvence snímků plamene. Snímkování plamene bylo prováděno s využitím fotografického přístroje Panasonic DMC – TZ1, který byl instalován na stativ ve vzdálenosti 1 m od osy pohárkového hořáku. Prostřednictvím sekvence snímků byl monitorován vliv koncentrace hasicích látek na barvu plamene, tvar plamene a pozici paty plamene.

5.6 Experimentální měření

V rámci experimentální části předložené disertační práce byla na výše popsané sestavě provedena série laboratorních měření. Cílem měření bylo pořídit sady dat, které by následně umožnily získat informaci o vlivu plyných hasicích látek na parametry nepředmíseného plamene. Měření byla zaměřena především na pořízení dat, která umožní získat informaci o tom, jak koncentrace vybraných plyných hasicích látek pod úrovní minimální hasicí koncentrace ovlivňuje frekvenci oscilace plamene. Vzhledem

k rozdílným hodnotám minimální hasicí koncentrace použitých plynných látek bylo z dat možné rovněž získat informaci o vlivu snížené koncentrace kyslíku v atmosféře na frekvenci oscilace plamene u plamenů vybraných druhů paliv. Měření byla prováděna u dvou reprezentativních typů plamenů, a to:

1. Nepředmíseného plamene metanu,
2. Nepředmíseného plamene *n*-heptanu.

Frekvence oscilace plamene byla stanovena z dat získaných měření intenzity vyzařování plamene. Intenzita vyzařování plamene byla měřena prostřednictvím fotodetektorů ve dvou různých oblastech vlnových délek, a to v oblasti 350 – 1100 nm prostřednictvím fotodetektoru PDA 36A – EC a v oblasti 1200 – 2570 nm s využitím fotodetektoru PDA 10DT – EC. Úroveň intenzity vyzařování plamene byla při měřeních u použitých fotodetektorů představována okamžitou hodnotou napětí z fotodetektorů ve voltech.

5.6.1 Měření frekvence oscilace plamene metanu

Měření orientovaná na frekvence oscilace plamene metanu byla prováděna při třech odlišných hodnotách objemového průtoku metanu pohárkem hořáku. Objemové průtoky metanu byly při měřeních zvoleny následovně:

1. Objemový průtok metanu pohárkem $Q_{1,metan} = 369,5 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, jemuž odpovídala výstupní rychlost metanu z pohárku $v_1 = 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.
2. Objemový průtok metanu pohárkem $Q_{2,metan} = 461,8 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, jemuž odpovídala výstupní rychlost metanu z pohárku $v_2 = 1,25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.
3. Objemový průtok metanu pohárkem $Q_{3,metan} = 554,2 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, jemuž odpovídala výstupní rychlost metanu z pohárku $v_3 = 1,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

U každého z uvedených objemových průtoků metanu bylo provedeno vždy pět měření za níže uvedených podmínek v obtoku pohárkového hořáku. Jednalo se o:

1. Vzduch bez přídavku hasicí látky.
2. Vzduch ve směsi s 30 % přídavkem minimální hasicí koncentrace hasicí látky.

3. Vzduch ve směsi s 60 % přídavkem minimální hasicí koncentrace hasicí látky.
4. Vzduch ve směsi s 90 % přídavkem minimální hasicí koncentrace hasicí látky.

Celkový objemový průtok vzduchu a následně i směsi vzduchu a hasicí látky v obtoku pohárkového hořáku byl při všech měřeních $Q_{obtok} = 40 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Měření bylo realizováno vždy z obou fotodetektorů současně. Postup měření je popsán v následujícím textu disertační práce.

Postup měření s metanem

Po instalaci fotodetektorů do pozice, viz **Tabulka 2** (měření $\text{CH}_4\text{V}_{1\text{q}_1} - \text{CH}_4\text{V}_{3\text{q}_1}\text{MEC90Ar}$) byly fotodetektory připojeny k napájecím zdrojům. Prostřednictvím koaxiálních kabelů s BNC konektory a impedancí 50Ω byly výstupy fotodetektorů připojeny k měřicím kanálům osciloskopu LeCroy. Fotodetektor PDA 10 DT – EC na měřicí kanál C1 osciloskopu a fotodetektor PDA 36 A – EC na měřicí kanál C2 osciloskopu. Úroveň zisku zesilovače fotodetektoru PDA 10 DT – EC byla nastavena na hodnotu 40 dB a dolnofrekvenční propust na hodnotu 5 kHz. U fotodetektoru PDA 36 A – EC byla úroveň zisku fotodetektoru nastavena na hodnotu 40 dB. Doba záznamu osciloskopu byla u obou měřicích kanálů nastavena na 20 s a frekvence vzorkování na 500 Hz.

Hodnoty vstupních tlaků paliva, vzduchu a hasicí látky do měřidel hmotnostního průtoku byly nastaveny pomocí redukčních ventilů na hodnotu $p_{vstup} = 2$ bary. Nastavené hodnoty tlaků odpovídaly hodnotám vstupních tlaků použitých měřidel hmotnostního průtoku pro zákaznické podmínky při kalibraci měřidel. Na laboratorním zdroji DIAMETRAL typ P230R51D byla nastavena hodnota výstupního napětí na 17 V (hodnota zvolena z doporučeného rozmezí napájecího napětí měřidel hmotnostního průtoku). Prostřednictvím výše uvedeného laboratorního zdroje byla napájena elektrickou energií měřidla hmotnostního průtoku vzduchu a hasicí látky. Pro napájení měřidla hmotnostního průtoku paliva elektrickou energií byla použita elektronická napájecí a řídicí jednotka Bronkhorst typu E-7110-BB. Objemový průtok paliva byl u měřidla hmotnostního průtoku F-201CV-1K0-ABD-33-V nastaven na hodnotu $475 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$. Nastavená

hodnota odpovídala požadované hodnotě průtoku metanu $369,5 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ a byla stanovena na základě hodnoty konverzního faktoru pro příslušnou část měřicího rozsahu použitého měřidla hmotnostního průtoku. Uváděný postup vycházel z kalibrace měřidla hmotnostního průtoku ($1000 \text{ ml}_n \cdot \text{min}^{-1}$ vzduch) a jeho měřicího principu (tepelně vodivostní princip). Pro stanovení hodnoty konverzního faktoru a ekvivalentu vzduchu byl použit program FLUIDAT Flow calculations verze. 2.05 [20]. Objemový průtok vzduchu byl u měřidla hmotnostního průtoku F-202AV-M10-ABD-44V nastaven prostřednictvím řídicího a monitorovacího panelu na hodnotu $40 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

Po připojení a nastavení všech hodnot bylo provedeno zapálení paliva v pohárku hořáku. Do hořáku byl instalován válec z křemenného skla a celá experimentální sestava byla po dobu jedné hodiny teplotně stabilizována. Po teplotní stabilizaci byla za uvedených podmínek (metan s objemovým průtokem $Q_{I, \text{metan}} = 369,5 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, obtok – vzduch s objemovým průtokem $40 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$) realizována prostřednictvím osciloskopu sada pěti časově synchronních měření z obou fotodetektorů.

Po sérii pěti měření se vzduchem bez přídavku hasicí látky byla následně realizována sada pěti měření s 30 % přídavkem minimální hasicí koncentrace dusíku do vzduchu v obtoku hořáku (tj. 30 % limitní hodnoty MEC). Na měřidle hmotnostního průtoku F-202EV-ABD-33-K byla prostřednictvím řídicího a monitorovacího panelu nastavena hodnota průtoku $3,11 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ (30 % MEC pro N_2). Průtok vzduchu byl u měřidla hmotnostního průtoku vzduchu snížen na hodnotu $36,9 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Při uvedených podmínkách byla realizována následná sada pěti časově synchronních měření z obou fotodetektorů. Poté byla na měřidle hmotnostního průtoku F-202EV-ABD-33-K nastavena hodnota průtoku dusíku na $6,22 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ (60 % MEC pro N_2). Průtok vzduchu byl snížen na hodnotu $33,8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a za uvedených podmínek byla realizována další sada pěti časově synchronních měření z fotodetektorů. Po měření s 60 % přídavkem MEC dusíku do obtoku hořáku byla na měřidle hmotnostního průtoku F-202EV-ABD-33-K nastavena hodnota průtoku dusíku na $9,33 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ (90 % MEC pro N_2), průtok vzduchu byl snížen na hodnotu $30,7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Při uvedených podmínkách byla opět provedena sada pěti časově synchronních měření z fotodetektorů. Data z jednotlivých měření byla z paměti osciloskopu následně zaznamenána na přenosný USB disk.

Celkový průtok směsi hasicí látky a vzduchu v obtoku hořáku byl při všech prováděných měřeních udržován na hodnotě $40 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ v souladu s požadavkem ISO 14 520 – 1 a NFPA 2001 ($40 \text{ l} \pm 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$).

Po měřeních provedených se vzduchem bez přídavku hasicí látky a s přídavkem dusíku byla při stejné hodnotě objemového průtoku metanu provedena identická měření s oxidem uhličitým a následně i argonem. U obou použitých hasicích látek byla měření realizována při 30 %, 60 % a 90 % úrovni přídavku minimální hasicí koncentrace hasicích látek do vzduchu v obtoku pohárkového hořáku. Měření s výše uvedenými procentuálními hodnotami minimální hasicí koncentrace byla prováděna rovněž v sadě po pěti měřeních u obou použitých fotodetektorů.

Pro regulaci průtoku oxidu uhličitého a argonu bylo použito, stejně jako v případě měření s dusíkem, měřidla hmotnostního průtoku F–202EV–ABD–33–K (Bronkhorst ΔP – FLOW). Vzhledem ke skutečnosti, že použité měřidlo hmotnostního průtoku bylo kalibrováno na dusík s maximální hodnotou objemového průtoku $25 \text{ l}_n \cdot \text{min}^{-1}$, bylo v případě oxidu uhličitého a argonu nutno stanovit hodnoty tzv. konverzních faktorů (Gas Conversion Factor). Tento konverzní faktor byl pro každý z použitých plynů a příslušnou část měřicího rozsahu hmotnostního průtokoměru nutné stanovit odděleně. Požadované hodnoty průtoků oxidu uhličitého a argonu byly s použitím stanovených hodnot konverzních faktorů následně u měřidla hmotnostního průtoku nastavovány prostřednictvím řídicího a monitorovacího panelu měřidla jako ekvivalent hodnot pro dusík. Pro stanovení hodnot konverzních faktorů a ekvivalentů dusíku byl použit program FLUIDAT Flow calculations verze. 2.05 [20].

Stejným způsobem jako v případě měření metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan} = 369,5 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ ($v_1 = 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$), bylo postupováno i v případě měření metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan} = 461,8 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ ($v_2 = 1,25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) a $Q_{3,metan} = 554,2 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ ($v_3 = 1,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). Detaily týkající se časové následnosti prováděných měření, nastavených hodnot a podmínek při měřeních lze nalézt v **Příloze E** disertační práce, viz **Tabulka E 1** až **Tabulka E 6**.

5.6.2 Měření frekvence oscilace plamene *n*-heptanu

Měření frekvence oscilace plamene *n*-heptanu, byla prováděna při volném odhořívání *n*-heptanu v pohárku hořáku. Pro každou z níže uvedených podmínek v obtoku pohárkového hořáku bylo provedeno vždy pět sad měření. Jednalo se o:

1. Vzduch bez přídavku hasicí látky.
2. Vzduch ve směsi s 30 % přídavkem minimální hasicí koncentrace hasicí látky.
3. Vzduch ve směsi s 60 % přídavkem minimální hasicí koncentrace hasicí látky.
4. Vzduch ve směsi s 90 % přídavkem minimální hasicí koncentrace hasicí látky.

Celkový objemový průtok vzduchu a následně i směsi vzduchu a hasicí látky v obtoku hořáku byl při všech prováděných měřeních $Q_{obtok} = 40 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Signál se zaznamenával synchronně vždy z obou fotodetektorů. Použité typy fotodetektorů, způsob sběru signálů z fotodetektorů, hasicí látky i měřidla hmotnostního průtoku pro regulaci vzduchu a hasicích látek byly identické jako v případě měření s metanem. Vzhledem k výrazně vyšší intenzitě vyzařování plamene *n*-heptanu a jeho výšce, bylo však při prováděných měřeních použito rozdílného horizontálního a vertikálního uspořádání fotodetektorů. Horizontální i vertikální pozici fotodetektorů při měřeních s *n*-heptanem v závislosti na podmínkách v obtoku pohárkového hořáku prezentuje **Tabulka 2**.

Způsob realizace přívodu kapalného *n*-heptanu je detailně popsán v kapitole 5.2.2 disertační práce. Hladina kapaliny v pohárku hořáku byla nastavena 1 mm od horní horizontální hrany pohárku. Pro udržování konstantní výšky hladiny bylo využito principu Mariottovy nádoby s kapilárou. Zásobní skleněná láhev s *n*-heptanem byla umístěna na laboratorní váhu a vertikálně polohovatelný stojan. Laboratorní váha byla využita pro monitorování aktuální hmotnosti kapaliny (monitorování rychlosti odhořívání). Vertikálně polohovatelný stojan umožnil snadné nastavení požadované výšky hladiny v pohárku.

Po připojení a nastavení všech hodnot bylo provedeno zapálení paliva v pohárku. Do hořáku byl instalován válec z křemenného skla a celá experimentální sestava byla po

dobu jedné hodiny teplotně stabilizována. Po teplotní stabilizaci sestavy byla při pozici fotodetektorů, viz **Tabulka 2** (měření $C_7H_{16}q_1$), provedena sada pěti časově synchronních měření z obou fotodetektorů. Po měřeních se vzduchem bez přídavku hasicí látky byly fotodetektory přemístěny do pozice pro měření s přídavkem hasicích látek do vzduchu, viz **Tabulka 2** (měření $C_7H_{16}q_1MEC30N_2 - C_7H_{16}q_1MEC90Ar$). U všech vybraných hasicích látek (dusík, oxid uhličitý, argon) byla realizována měření při 30 %, 60 % a 90 % úrovni přídavku minimální hasicí koncentrace plynných hasicích látek do vzduchu v obtoku pohárkového hořáku. Měření s výše uvedenými procentuálními hodnotami minimální hasicí koncentrace byla prováděna opět v sadě pěti časově synchronních měření z obou fotodetektorů. V průběhu všech měření bylo s využitím laboratorní váhy prováděno monitorování aktuální hmotnosti kapaliny (*n*-heptan). Hmotnost kapaliny byla v průběhu všech měření zaznamenávána s periodou 5 s. Detaily týkající se časové následnosti prováděných měření, nastavených hodnot a podmínek při měření s *n*-heptanem, lze nalézt v **Příloze E** disertační práce, viz **Tabulka E 7** a **Tabulka E 8**.

Seznam přístrojů a látek použitých v průběhu laboratorního experimentálního měření nepředmíseného plamene metanu a *n*-heptanu uvádí **Tabulka 4**.

Tabulka 4: Použité přístroje a látky

Položka	Popis	Výrobce	Počet ks.	Výrobní/typové číslo	Poznámka
1	F-201CV-1K0-ABD-33-V	Bronkhorst	1	M 9209999 A	Měřidlo hmotnostního průtoku plynného paliva CH ₄
2	F-202AV-M10-ABD-44V	Bronkhorst	1	M 9209976 A	Měřidlo hmotnostního průtoku vzduchu
3	F-202EV-ABD-33-K	Bronkhorst	1	M 9209976 B	Měřidlo hmotnostního průtoku CO ₂ , N ₂ , Ar
4	Digitální programovatelná elektronická napájecí a řídicí jednotka E-7110-BB	Bronkhorst	1	M 9209999 D	Ovládání a napájení měřidla hmotnostního průtoku CH ₄
5	R/C řídicí a monitorovací panel Bright typ B1	Bronkhorst	2	7.09.199	Ovládání měřidla hmotnostního průtoku vzduchu, CO ₂ , N ₂ , Ar
6	Laboratorní zdroje typ P230R51D	Diametral	1	2199	Napájení měřidel hmotnostního průtoku vzduchu, CO ₂ , N ₂ , Ar
7	Si fotodetektor PDA36A	Thorlabs	1	-	Snímání signálu z plamene (350 - 1100 nm)
8	InGaAs fotodetektoru PDA10DT	Thorlabs	1	-	Snímání signálu z plamene (1200 - 2750 nm)
9	Napájecí zdroj AD-9639	GlobTek	2	TR23V1000N05 - 705	Napájecí zdroje fotodetektorů
10	Osciloskop LeCroy model Wavesurfer 42Xs	LeCroy	1	LCRY0310M24809	Sběr a záznam signálů z fotodetektorů
11	Redukční ventil Wika RSD2 400/6 AR	Wika	1	460116378	Redukční ventil tlakové láhve CO ₂
12	Redukční ventil Wika RSD1 400/60 AR	Wika	1	460116331	Redukční ventil tlakové láhve Ar
13	Redukční ventil Wika RSD2 400/15 N2	Wika	1	46116390	Redukční ventil tlakové láhve N ₂
14	Redukční ventil Concoa 302 23S1-01-D01	Concoa	1	07908 EVL	Redukční ventil tlakové láhve CH ₄
22	Pohárkový hořák	Autor	1	-	Návrh a konstrukce autor disertační práce
20	Záznamník testo 177-H1	Testo	1	01035424/411	Měření vlhkosti (laboratoř LC 116)
21	Altimeter/Barometer GTD 1100	Greisinger electronic	1	-	Měření teploty a tlaku (laboratoř LC 116)
15	Hasící látka dusík (N ₂)	SIAD	1	-	Čistota 99,999 %
16	Hasící látka oxid uhličitý (CO ₂)	SIAD	1	-	Čistota 99,5 %
17	Hasící látka argon (Ar)	SIAD	1	-	Čistota 99,999 %
18	Plynné palivo metan (CH ₄)	SIAD	1	-	Čistota 99,95 %
19	Kapalné palivo <i>n</i> -heptan (C ₇ H ₁₆)	Penta	1	-	Čistota p.a.
20	Laboratorní váha typ PK- 4801	Denver instrument	1	033WCG033D	Měření rychlosti odhořívání <i>n</i> -heptanu
21	Fotoaparát Panasonic model DMC-TZ1	Panasonic	1	FA-HA03710 R	Snímkování plamene.
22	Fotografický stativ	Hama	1	Hama Star 61	Snímkování plamene.

5.7 Výsledky měření a diskuse

Výsledky experimentálních měření představují nosnou část disertační práce. Hlavní pozornost byla v rámci provedených experimentů věnována nepředmísenému plameni metanu a *n*-heptanu. Plamen obou uvedených paliv byl za využití experimentální sestavy mapován v prostředí s různou koncentrací plynných hasicích látek a tudíž i koncentrací kyslíku. Experimentální sestava hořáku zahrnující rovněž systém přívodu médií, navržena a realizovaná pro potřeby laboratorních měření v rámci disertační práce, byla evidována CTT VŠB - TU Ostrava jako funkční vzorek [66].

Realizovaná měření byla orientována na měření intenzity vyzařování plamene při různých hodnotách minimální hasicí koncentrace plynných hasicích látek v okolní atmosféře plamene. Zpracování dat získaných měřením intenzity vyzařování umožnilo získat informace o závislosti frekvence oscilace plamene na koncentraci hasicí látky, jakož i závislosti frekvence oscilace plamene na koncentraci kyslíku. Měření intenzity vyzařování plamene bylo doplněno o fotografické snímkování barvy a výšky plamene. Všechny měřené a sledované parametry patří v současné době do skupiny primárních parametrů plamene, které využívají prvky optické detekce požáru v systémech elektrické požární signalizace.

V průběhu laboratorních experimentů bylo provedeno 200 měření, a to v obou oblastech rozsahu vlnových délek použitých fotodetektorů. Celkově tedy bylo nutné zpracovat a vyhodnotit data ze 400 měření.

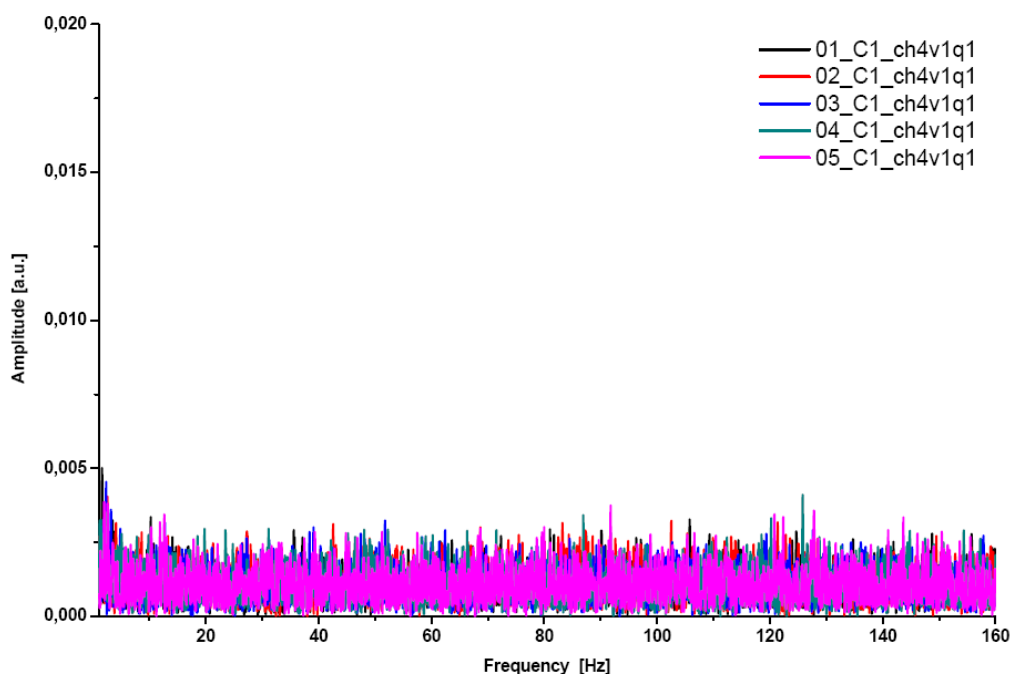
5.7.1 Výsledky měření plamene metanu

Z amplitudových a amplitudových frekvenčních charakteristik, které byly získány z dat při měření plamene metanu s objemovým průtokem paliva $Q_{1,metan} = 369,5 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ ($v_1 = 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$), lze vyvodit následující poznatky:

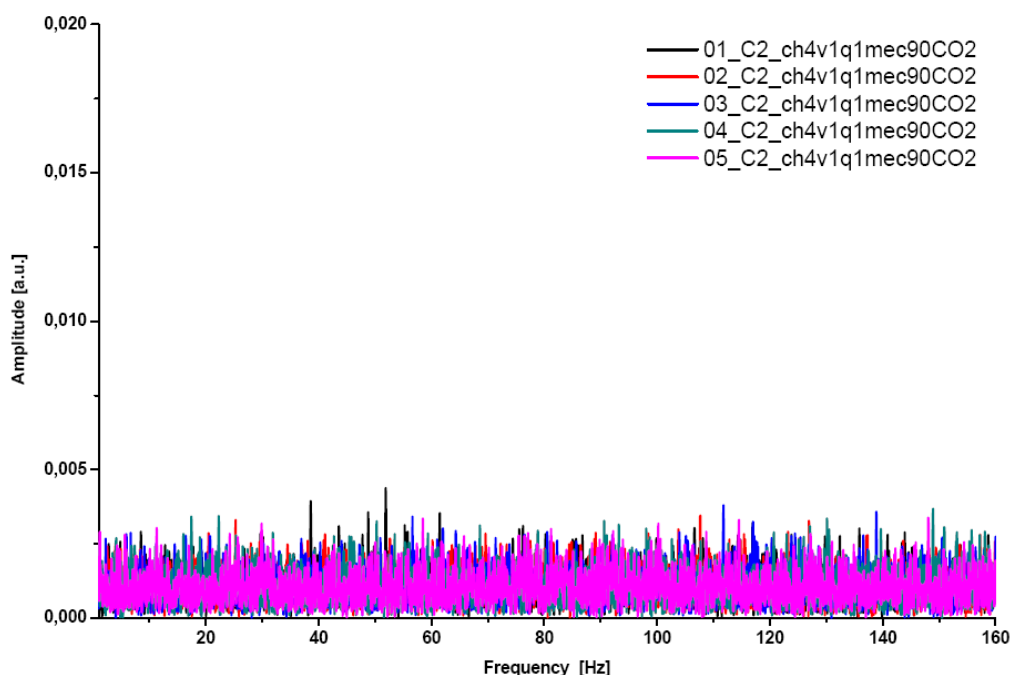
- Plamen metanu, který byl obtékán vzduchem, nevykazoval za podmínek tohoto měření žádné pravidelné měřitelné oscilace.

- Přídavek hasicích látek s objemovou koncentrací odpovídající 30 %, 60 % a 90 % MEC do okolního prostředí plamene (do obtoku pohárkového hořáku) nevyvolal při zmíněném průtoku paliva u plamene vznik pravidelných měřitelných oscilací.
- Vlivem rostoucí koncentrace hasicích látek (s fyzikálním mechanismem hašení) v okolním prostředí plamene klesá intenzita vyzařování plamene.

Skutečnost, že plamen metanu, který byl obtékán vzduchem, nevykazoval žádné pravidelné oscilace, a to ani v jednom z rozsahů vlnových délek použitých fotodetektorů, znázorňuje **Obrázek 22** a **Obrázek 23**. Uvedené obrázky ilustrují amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu (CH_4 v Q_1), které byly získány po zpracování signálů z fotodetektorů s využitím FFT. **Obrázek 22** zachycuje výsledky z měření plamene metanu, který byl monitorován fotodetektorem PDA 10DT-EC v rozsahu vlnových délek 1200 – 2570 nm. **Obrázek 23** prezentuje výsledky měření za identických podmínek získané při měření fotodetektorem PDA 36A – EC v rozsahu vlnových délek 350 – 1100 nm.

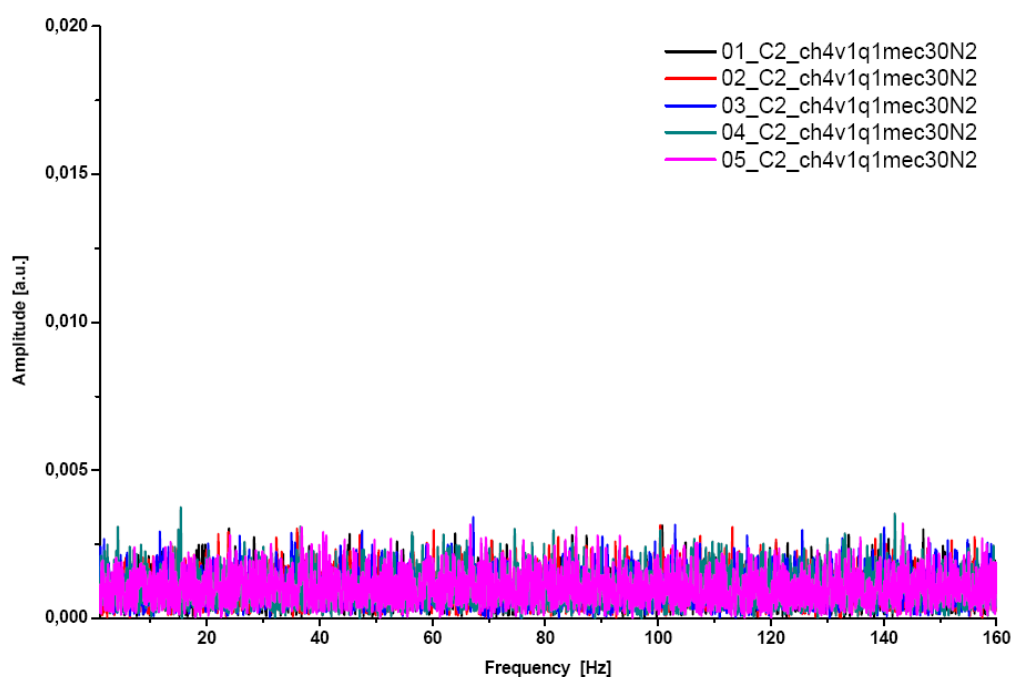


Obrázek 22: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,\text{metan}}$ bez přídavku hasicí látky do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)

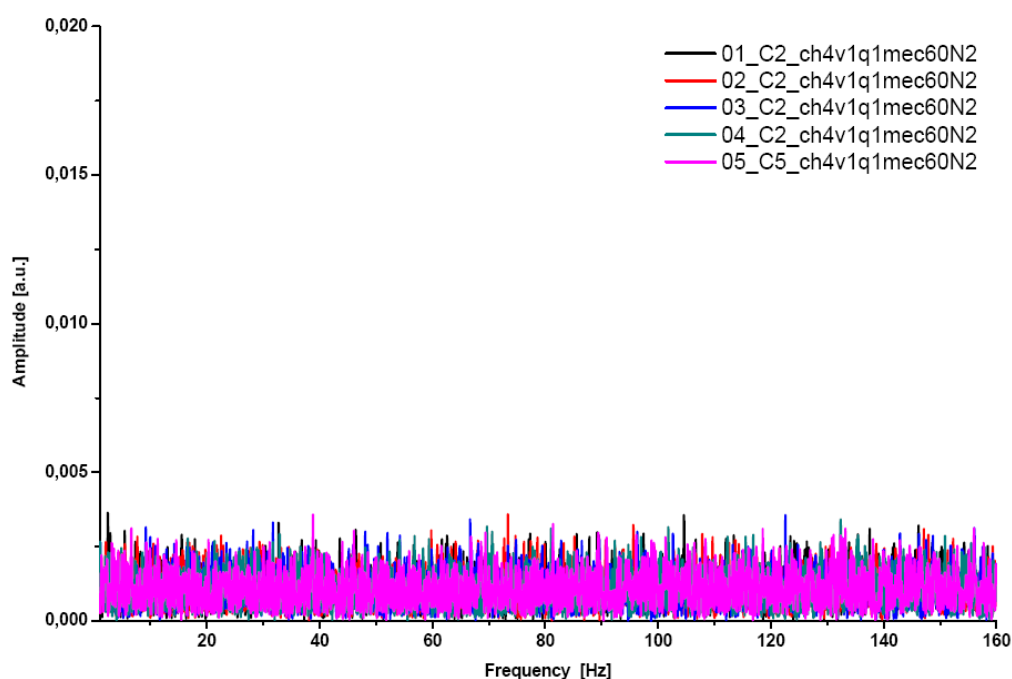


Obrázek 23: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{I,metan}$ bez přídavku hasicí látky do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)

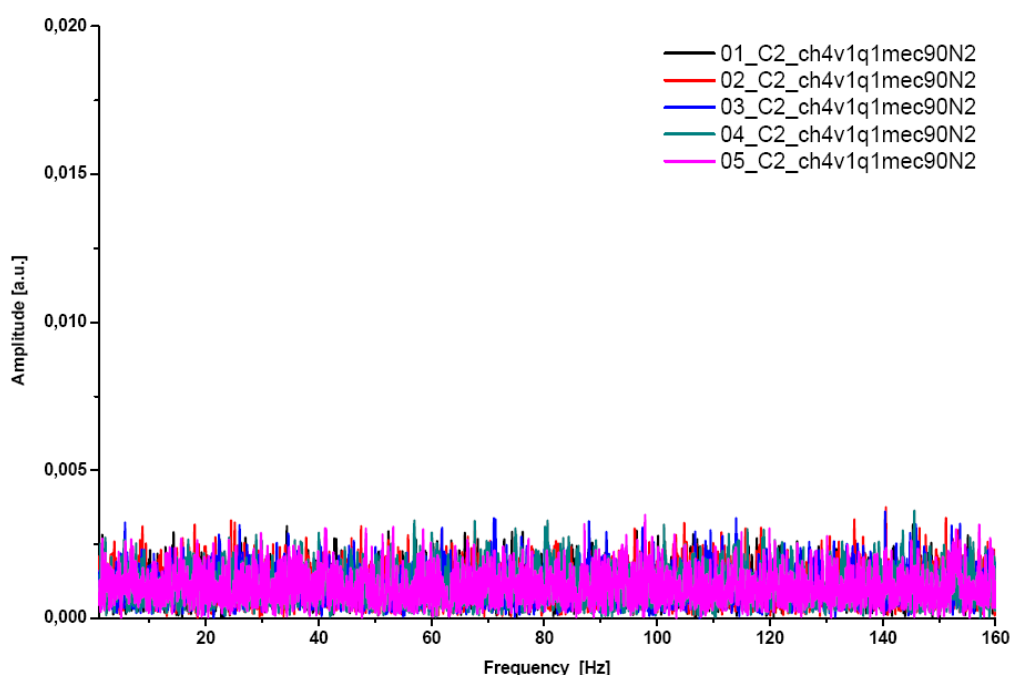
Obecný poznatek, že přídavek hasicích látek s objemovou koncentrací odpovídající 30 %, 60 % a 90 % MEC do okolního prostředí plamene (do obtoku pohárkového hořáku) nevyvolal vznik žádných pravidelných měřitelných oscilací tohoto plamene metanu, ukazují **Obrázek 24**, **Obrázek 25** a **Obrázek 26**. Uvedené obrázky ilustrují amplitudové frekvenční charakteristiky plamene metanu, které byly získány po frekvenční analýze prostřednictvím FFT ze série dat pěti měření fotodetektořem PDA 36A – EC. Plamen metanu byl v prezentovaných případech obtékán směsí vzduchu a dusíku s objemovou koncentrací odpovídající 30 %, 60 % a 90 % MEC dusíku ve směsi.



Obrázek 24: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ s přidavkem 30 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)

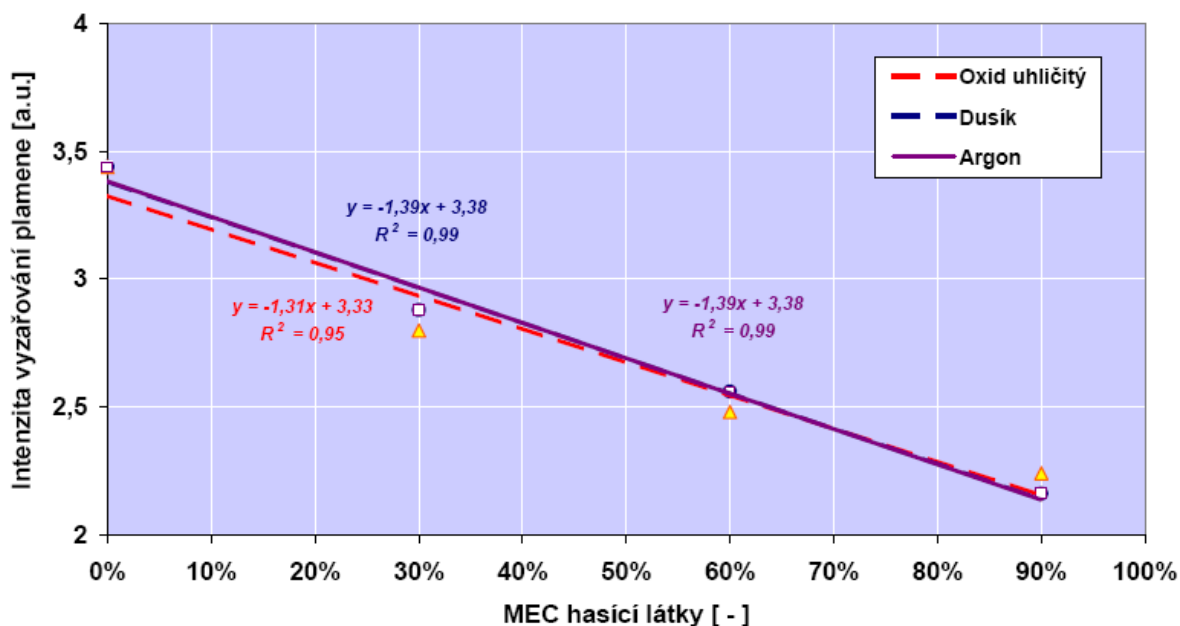


Obrázek 25: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ s přidavkem 60 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)

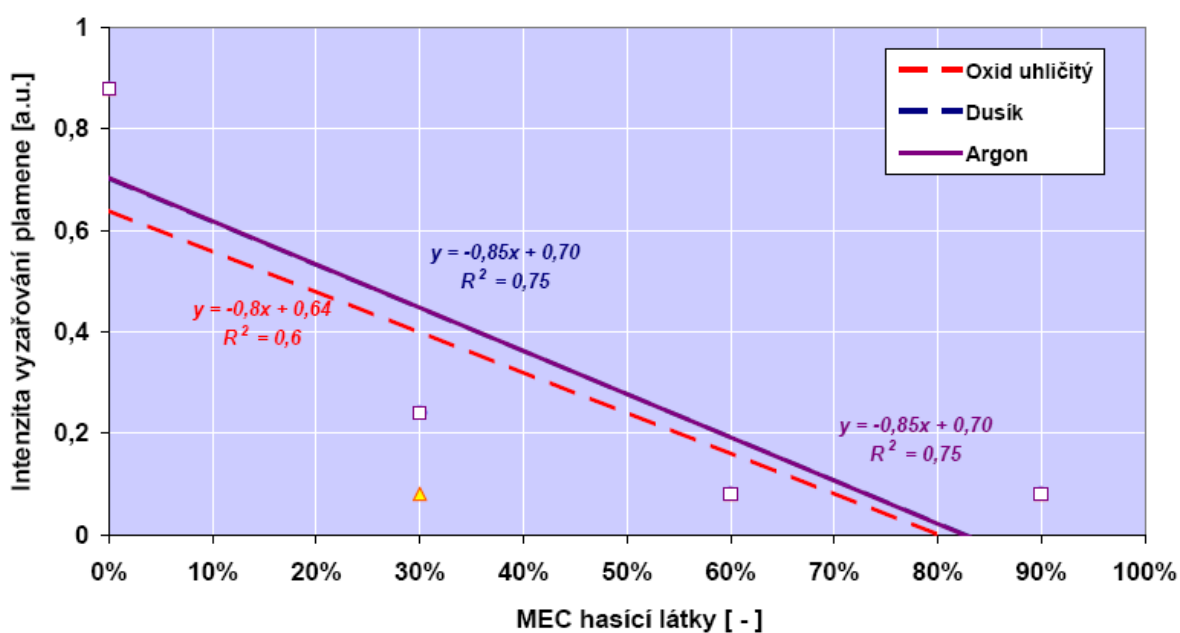


Obrázek 26: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ s přidavkem 90 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)

Vliv rostoucí koncentrace hasicích látek v okolním prostředí plamene (obtoku pohárkového hořáku) na snižování intenzity vyzařování plamene metanu znázorňuje **Obrázek 27** a **Obrázek 28**. Oba uvedené obrázky byly získány zpracováním okamžitých hodnot amplitudy signálů z fotodetektorů. Vzhledem ke skutečnosti, že okamžitá hodnota amplitudy signálu z fotodetektoru je závislá na intenzitě vyzařování plamene, lze intenzitu vyzařování plamene vyjádřit střední hodnotou amplitudy signálů z fotodetektorů. **Obrázek 27** prezentuje trendy závislosti intenzity vyzařování plamene metanu na procentuálním přidavku MEC hasicí látky u plamene, který byl monitorován fotodetektorem PDA 10DT – EC (1200 – 2570 nm). **Obrázek 28** ilustruje tuto skutečnost pro případ, kdy byl plamen metanu monitorován fotodetektorem PDA 36A – EC (350 – 1100 nm).



Obrázek 27: Trendy závislosti intenzity vyzařování plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ na procentu MEC hasících látek v obtoku pohárkového hořáku (1200 – 2570 nm)

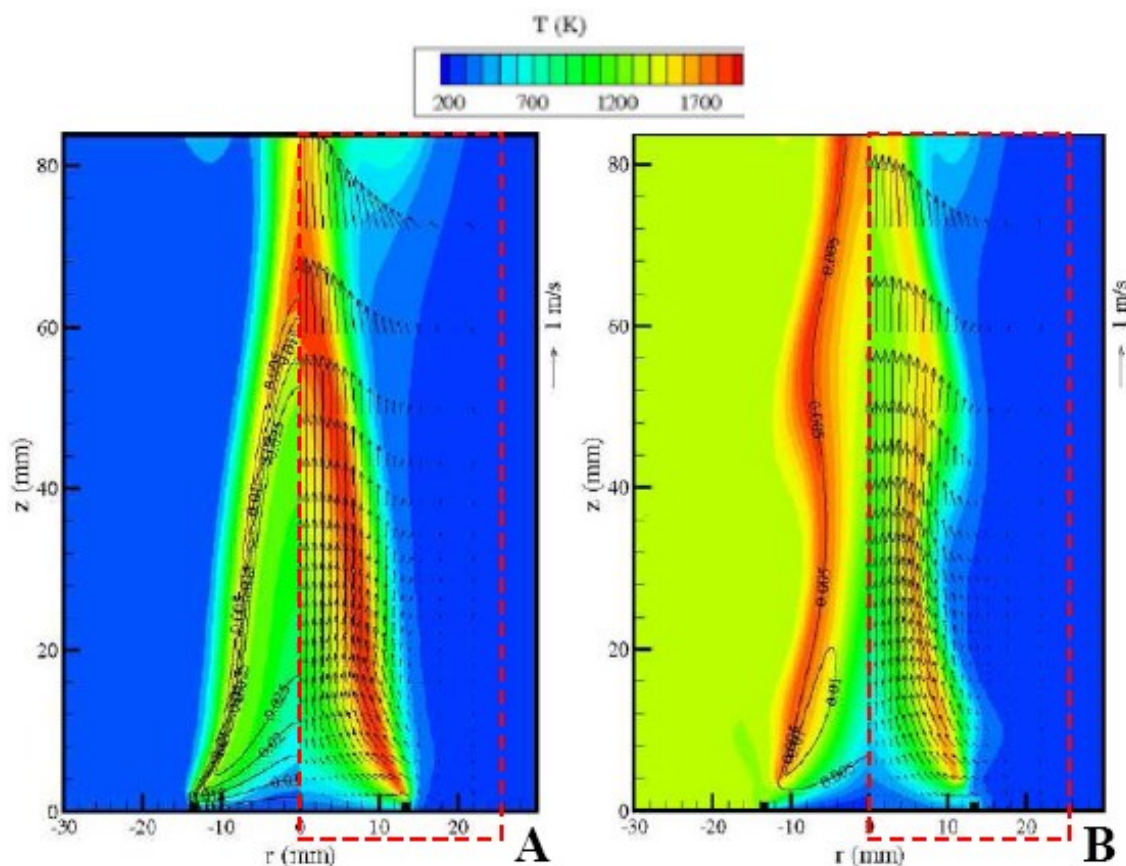


Obrázek 28: Trendy závislosti intenzity vyzařování plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ na procentu MEC hasících látek v obtoku pohárkového hořáku (350 – 1000 nm)

Závislost intenzity vyzařování plamene na koncentraci hasící látky lze vysvětlit závislostí intenzity vyzařování na teplotě. Vlivem zvyšující se koncentrace hasící látky v okolním prostředí plamene (obtoku pohárkového hořáku) dochází u plamene metanu ke snižování lokálních teplot v plameni, klesá množství sazí vznikajících v plameni a tím

dochází k poklesu intenzity vyzařování. Zmiňovaný proces je v tomto případě ovlivněn několika fyzikálními fenomény, jakými jsou například vedení tepla, zředování apod. [21].

Výše uvedené vysvětlení odpovídá také poznatkům získaným simulací plamene metanu v pohárkovém hořáku dle *Katta et al.* [23]. Výsledky simulací plamene metanu, který byl obtékán v pohárkovém hořáku vzduchem a následně směsí vzduchu a oxidu uhličitého dle *Katta et al.* znázorňuje **Obrázek 29**. **Obrázek 29 A** v pravé polovině (červené ohraničení) prezentuje lokální teploty a rychlostní pole v plameni metanu, který byl v pohárkovém hořáku obtékán vzduchem bez přídavku hasicí látky. **Obrázek 29 B** v pravé polovině (červené ohraničení) prezentuje lokální teploty a rychlostní pole v plameni metanu za podmínek, kdy byl plamen obtékán směsí vzduchu a oxidu uhličitého. Objemová koncentrace oxidu uhličitého ve směsi se vzduchem byla v uvedeném případě 14,5 % obj. (MEC CO₂ pro metan 15,7 % obj.). Z výsledků simulací dle zmiňovaného autora je dobře patrný pokles lokálních teplot především v reakční zóně plamene.



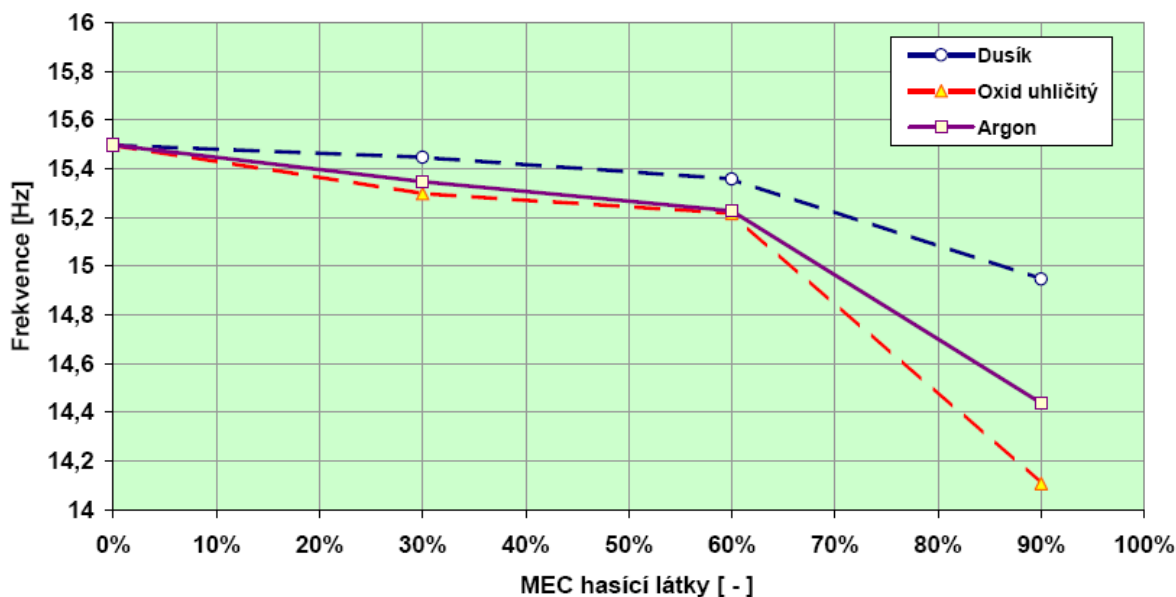
Obrázek 29: Výsledky simulací teplotního a rychlostního pole plamene metanu pohárkového hořáku bez (A) a s přídavkem CO₂ (B) do obtoku plamene pohárkového dle *Katta et. al* [23]

Všeobecně lze z výsledků měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan}$ konstatovat, že plamen metanu měl za podmínek tohoto měření ustálený charakter bez výrazných pravidelných vírových struktur. V případě intenzity vyzařování plamene bylo prokázáno, že v důsledku zvyšující se koncentrace hasicí látky v okolním prostředí plamene dochází k výraznému poklesu intenzity vyzařování plamene. Uvedené poznatky byly při měřeních zaznamenány v obou monitorovaných rozsazích vlnových délek použitých fotodetektorů.

Z amplitudových a amplitudových frekvenčních charakteristik, které byly získány z dat experimentálních měření plamene metanu s objemovým průtokem paliva $Q_{2,metan} = 461,8 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ ($v_2 = 1,25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) a $Q_{3,metan} = 554,2 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ ($v_3 = 1,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$), lze vyvodit následující poznatky:

- Frekvence oscilace plamene metanu je v tomto případě funkcí koncentrace hasicí látky v okolním prostředí plamene (v obtoku pohárkového hořáku).
- Frekvence oscilace plamene metanu je funkcí koncentrace kyslíku v okolním prostředí plamene (v obtoku pohárkového hořáku).
- Plamen osciluje se stejnou frekvencí v obou rozsazích vlnových délek použitých fotodetektorů.
- Vlivem rostoucí koncentrace hasicí látky (s fyzikálním mechanismem hašení) v okolním prostředí plamene klesá intenzita vyzařování plamene.

Vlivem zvyšující se koncentrace hasicí látky (s fyzikálním mechanismem hašení) v okolním prostředí plamene dochází u oscilujícího plamene metanu ke snižování frekvence oscilace. Uvedenou skutečnost znázorňuje **Obrázek 30**. Tento obrázek prezentuje závislost frekvence oscilace plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$ na přídatku procentuální hodnoty MEC hasicích látek, které byly aplikovány do obtoku plamene v pohárkovém hořáku.

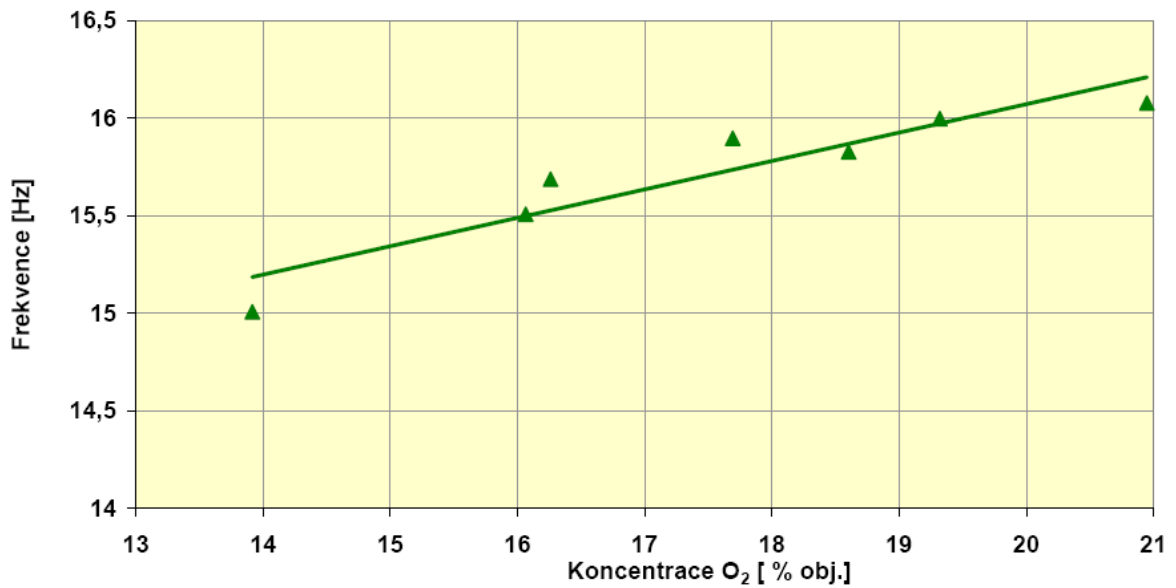


Obrázek 30: Vliv koncentrace hasících látek na frekvenci oscilace plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$

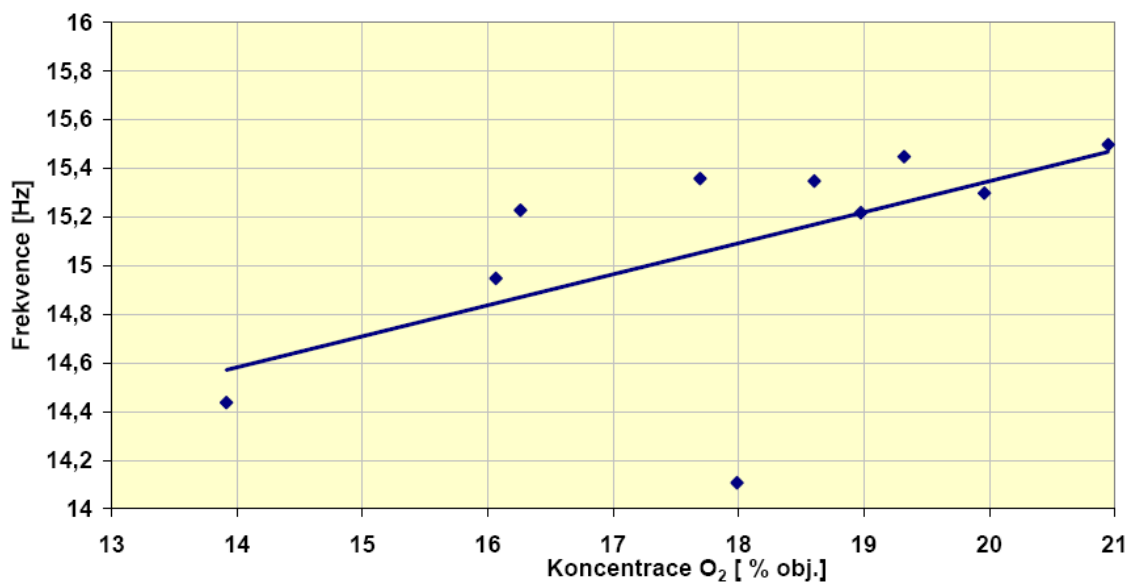
Z **Obrázku 30** je možné rovněž usuzovat, že hasící látky s vyšší relativní molekulovou hmotností ($M_r(\text{CO}_2) > M_r(\text{Ar}) > M_r(\text{N}_2)$ [30]) mají větší vliv na změnu frekvence oscilace plamene než látky s relativní molekulovou hmotností nižší.

Analogicky k výše uvedenému lze z výsledků získaných měření vyvodit, že klesající koncentrace kyslíku v okolním prostředí oscilujícího plamene metanu způsobuje snížení jeho frekvence oscilace. Tuto skutečnost ilustruje **Obrázek 31** a **Obrázek 32**. **Obrázek 31** znázorňuje trend závislosti frekvence oscilace plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$ na koncentraci kyslíku. **Obrázek 32** prezentuje tuto závislost u plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$.

Závislost frekvence oscilace plamene metanu na koncentraci hasící látky i koncentraci kyslíku lze vysvětlit závislostí frekvence oscilace plamene na hodnotě Richardsonova čísla v souladu s poznatky dle *Gotoda et al.* [22] a *Cetegen et al.* [25]. Oscilační frekvence plamene se za předpokladu, že jsou průměr hořáku i výtoková rychlost paliva konstantní, snižuje v důsledku snižující se hodnoty Richardsonova čísla [22]. Ke snižování hodnoty Richardsonova čísla dochází vlivem změny hustoty okolního prostředí plamene. Rostoucí koncentrace hasící látky v okolní atmosféře plamene vede k nárůstu hustoty okolního prostředí plamene, jenž způsobuje snižování hodnoty Richardsonova čísla (viz rovnice 4).



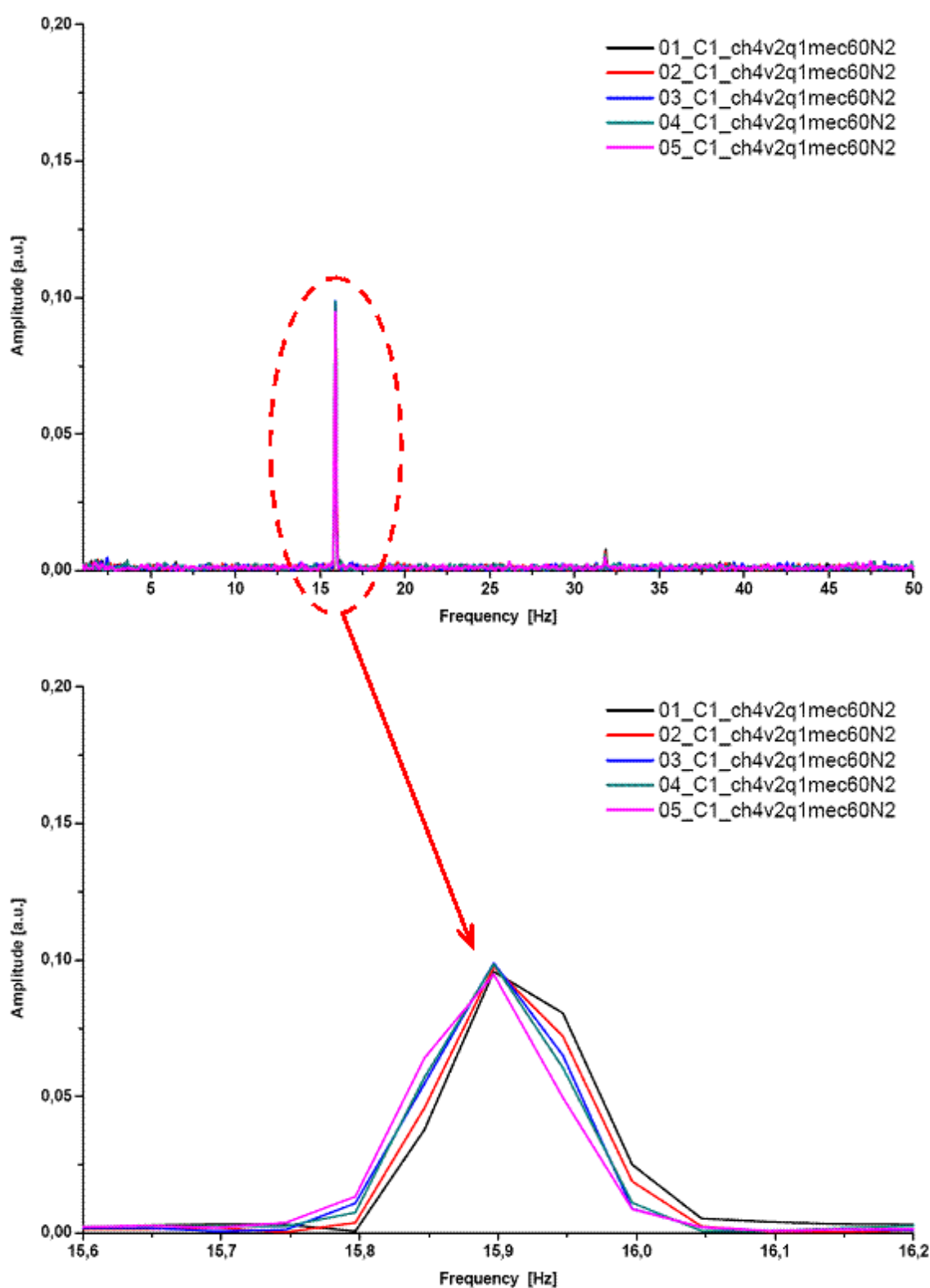
Obrázek 31: Trend závislosti frekvence oscilace plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$ na koncentraci O_2 v obtoku pohárkového hořáku



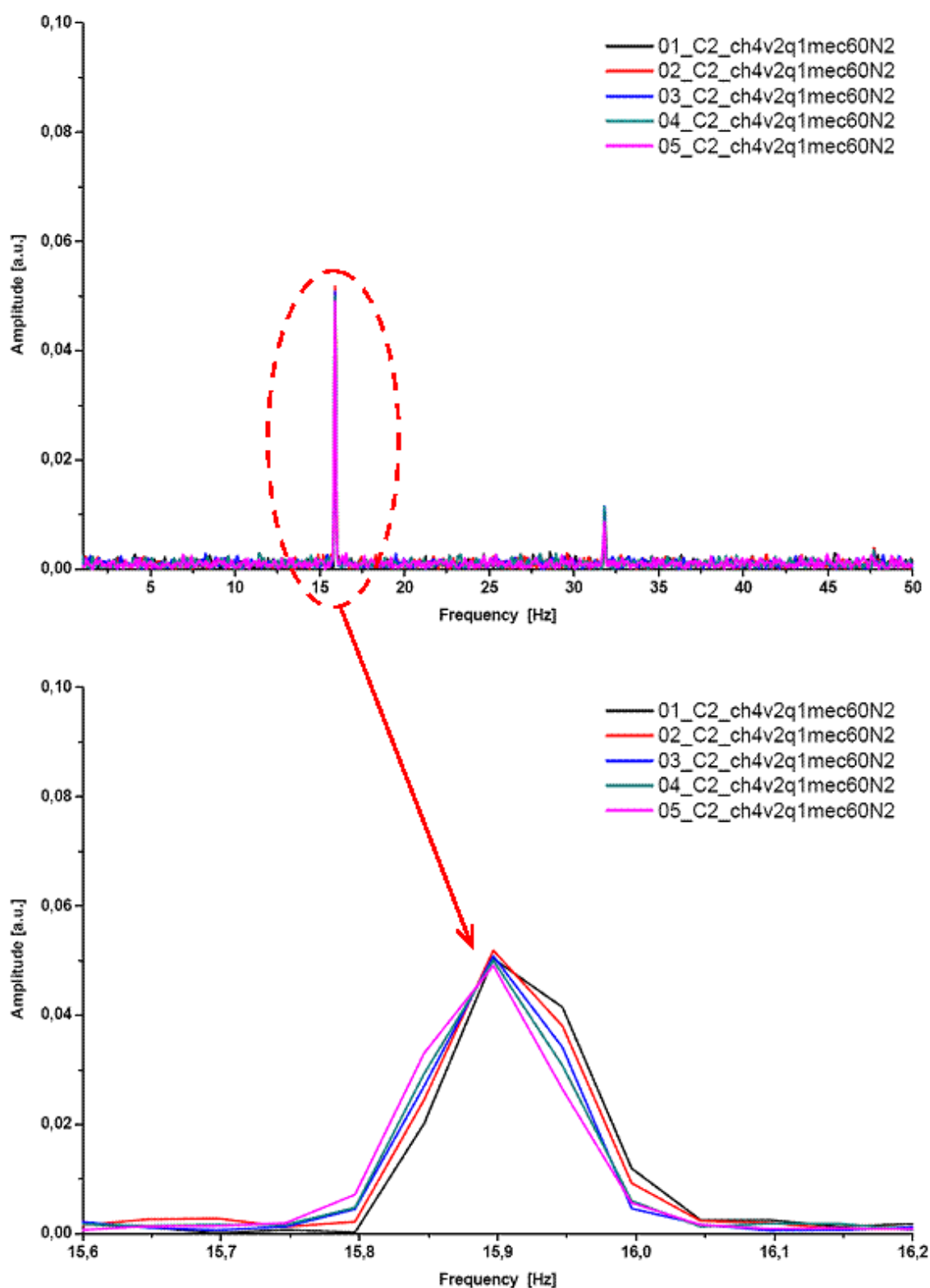
Obrázek 32: Trend závislosti frekvence oscilace plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$ na koncentraci O_2 v obtoku pohárkového hořáku

Skutečnost, že plamen metanu osciloval se stejnou frekvencí v obou rozsazích vlnových délek použitých fotodetektorů, potvrzuje poznatky o nezávislosti frekvence oscilace na rozsahu vlnových délek dle Šarovarova [11], [12] z experimentálních měření plamene acetonu, benzínu a borovicového dřeva. Nezávislost frekvence oscilace plamene na rozsahu vlnových délek lze na základě výsledků experimentálních měření metanu konstatovat i v případě, kdy byl plamen obtékán směsí vzduchu a hasicí látky (při snížené

koncentraci kyslíku). Z výsledků získaných měření plamene metanu lze konstatovat, že emise z plamene má v každém z rozsahů vlnových délek shodnou frekvenci a v jednotlivých rozsazích vlnových délek se liší pouze intenzitou vyzařování. Shodu frekvence oscilace plamene metanu identifikovanou při měřeních v rozsahu vlnových délek použitých fotodetektorů zachycuje **Obrázek 33** a **Obrázek 34**. **Obrázek 33** znázorňuje amplitudové frekvenční charakteristiky získané z dat série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$. Plamen metanu byl v uvedeném případě obtékán směsí vzduchu a dusíku s koncentrací dusíku ve směsi na úrovni 60 % MEC dusíku pro metan. Pro snímání intenzity vyzařování plamene metanu byl použit fotodetektor PDA 10DT – EC (1200 – 2570 nm). **Obrázek 34** zachycuje identická měření jako **Obrázek 33**, v uvedeném případě však provedená s využitím fotodetektoru PDA 36A – EC (350 – 1100 nm).

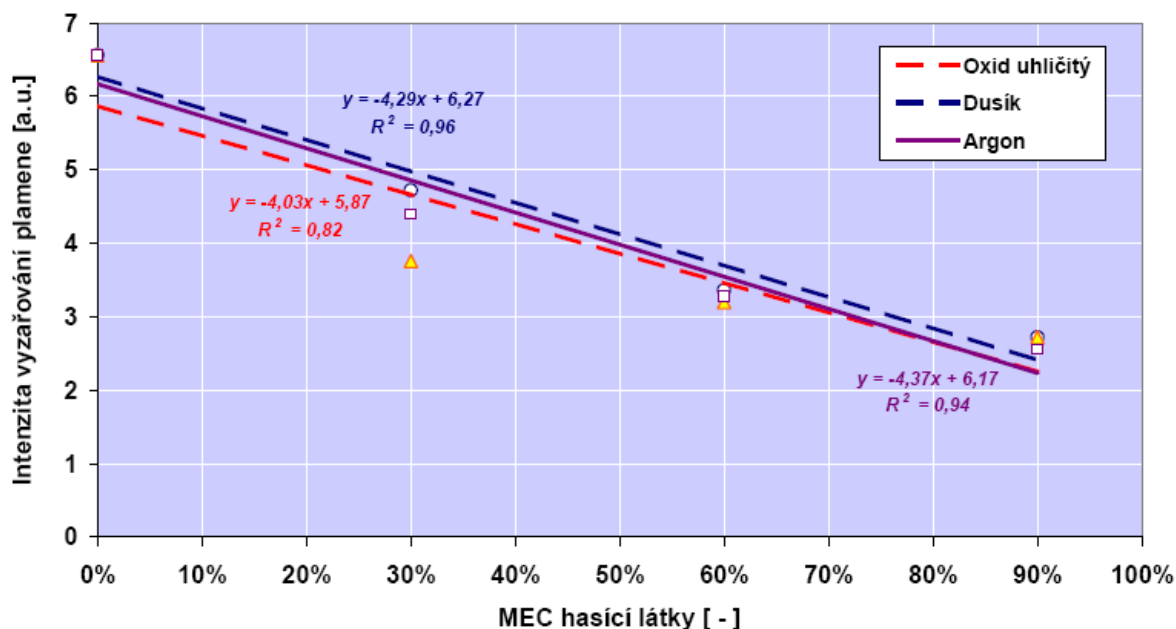


Obrázek 33: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$ s přidavkem 60 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)

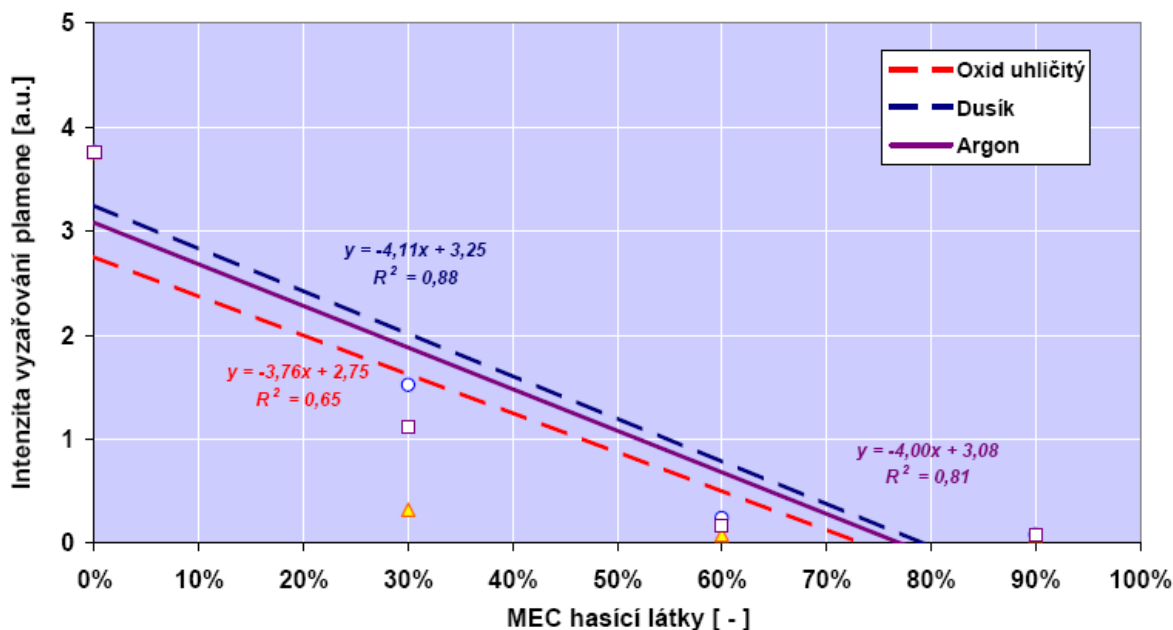


Obrázek 34: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$ s přidavkem 60 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)

Pokles intenzity vyzařování plamene způsobený přidavkem hasicí látky (s fyzikálním mechanismem hašení) lze, obdobně jako v případě plamene metanu s ustáleným charakterem, odvodit z okamžitých hodnot amplitudy signálů z fotodetektorů. Intenzitu vyzařování vyjádřenou střední hodnotou amplitudy signálu z fotodetektorů v závislosti na procentuálním přidavku MEC hasicích látek znázorňují u oscilujícího plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$ **Obrázek 35** a **Obrázek 36**. **Obrázek 35** ilustruje trendy závislosti intenzity vyzařování plamene metanu na procentuálním přidavku MEC hasicích látky u plamene metanu, který byl monitorován fotodetektorem PDA 10DT – EC (1200 – 2570 nm). **Obrázek 36** prezentuje tuto skutečnost pro případ, kdy byl plamen metanu pozorován fotodetektorem PDA 36A – EC (350 – 1100 nm).

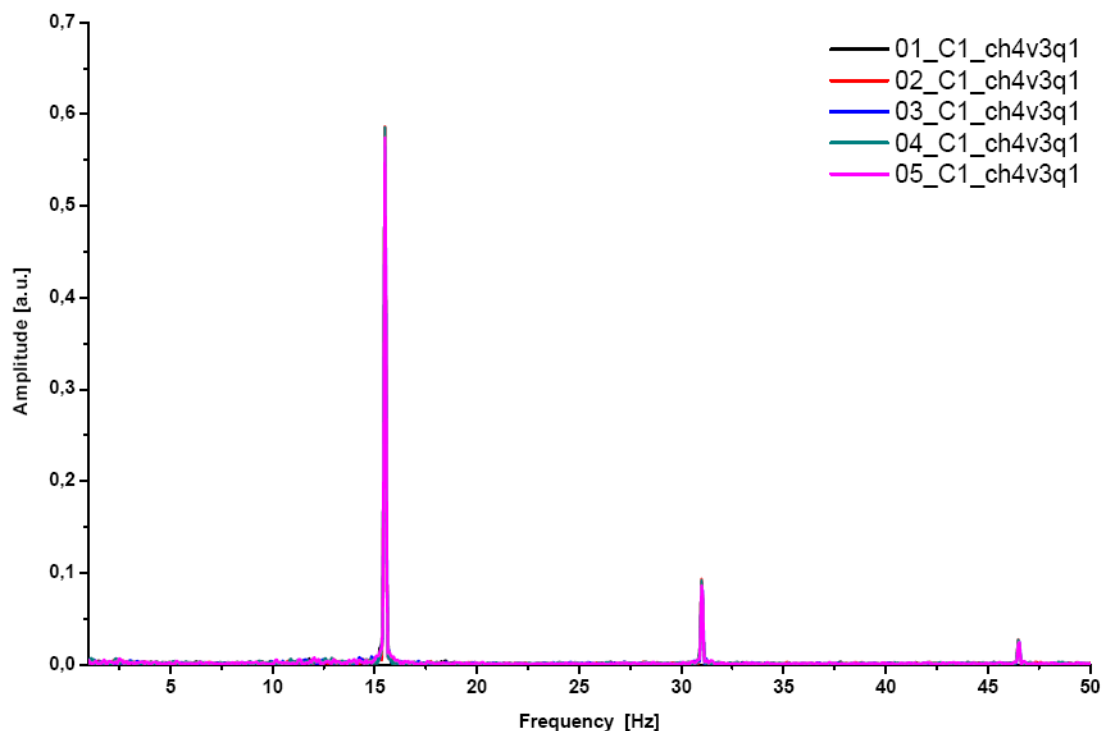


Obrázek 35: Trendy závislosti intenzity vyzařování plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$ na procentu MEC hasicích látek v obtoku pohárkového hořáku (1200 – 2570 nm)

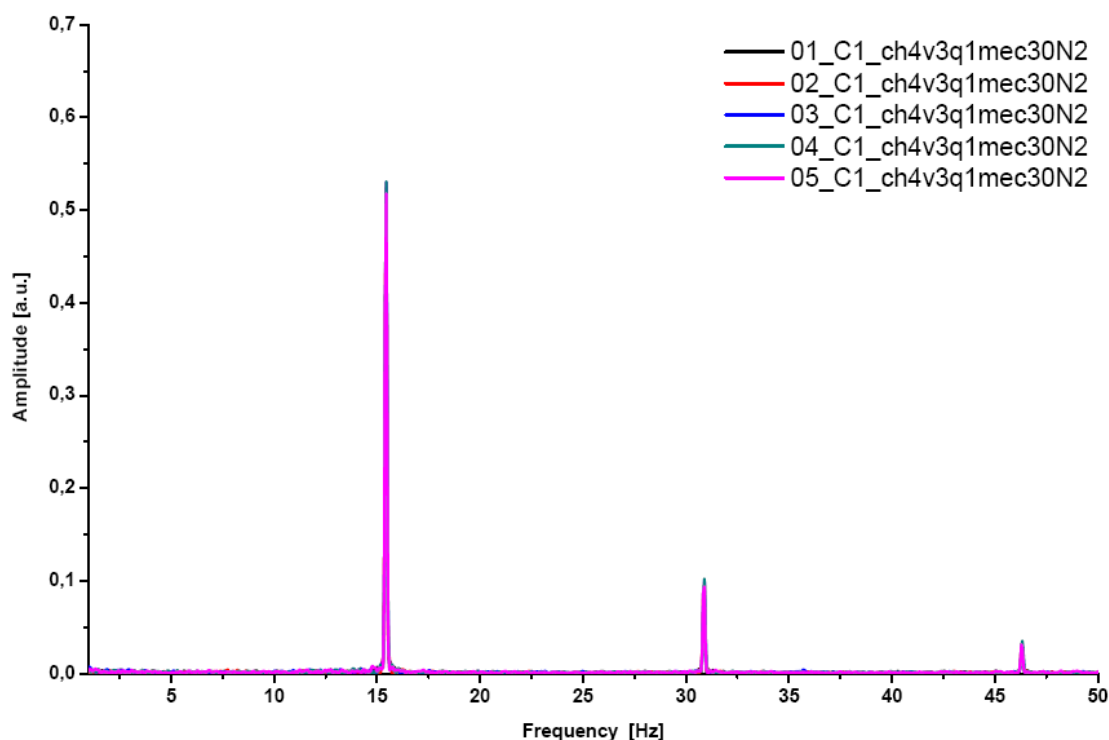


Obrázek 36: Trendy závislosti intenzity vyzařování plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{2,metan}$ na procentu MEC hasicích látek v obtoku pohárkového hořáku (350 – 1100 nm)

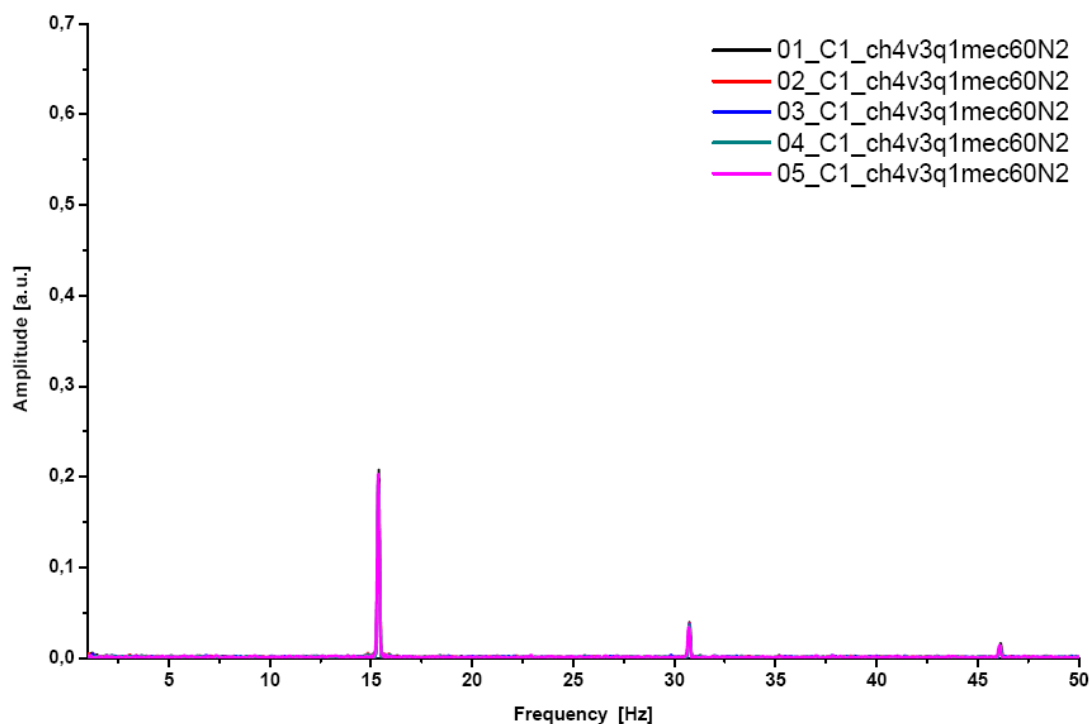
Pokles intenzity vyzařování lze u oscilujícího plamene metanu vyvodit rovněž z amplitudových frekvenčních charakteristik plamene, kdy pokles intenzity vyzařování plamene vyvolaný zvyšujícím se přidavkem hasicí látky způsobuje pokles amplitudy frekvence oscilace plamene. Dobře zřetelný je pokles amplitudy (intenzity vyzařování plamene) především u základní frekvence oscilace plamene. Tuto skutečnost znázorňují u plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$ **Obrázek 37**, **Obrázek 38**, **Obrázek 39** a **Obrázek 40**. Uvedené obrázky prezentují amplitudové frekvenční charakteristiky sérií pěti měření plamene metanu, který byl obtékán vzduchem a následně směsí vzduchu a dusíku s objemovou koncentrací odpovídající 30 %, 60 % a 90 % MEC dusíku pro metan. Pro snímání signálu z plamene byl v prezentovaném případě použit fotodetektor PDA 10DT – EC (1200 – 2570 nm).



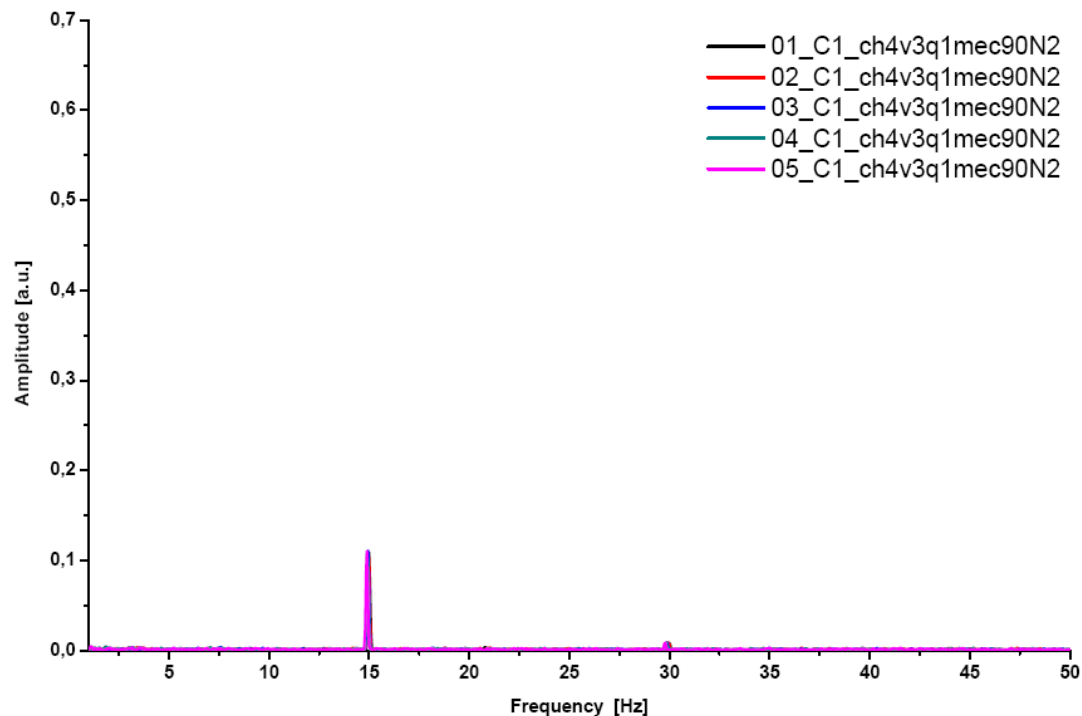
Obrázek 37: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$ bez přidavku hasicí látky do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)



Obrázek 38: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$ s přidavkem 30 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)



Obrázek 39: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$ s přidavkem 60 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)



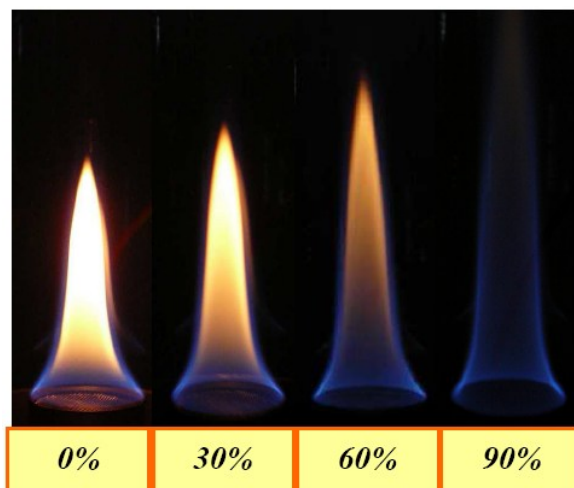
Obrázek 40: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{3,metan}$ s přidavkem 90 % MEC dusíku do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)

Souhrnné výsledky měření oscilace plamene metanu v pohárkovém hořáku jsou zaznamenány v **Příloze A** disertační práce, viz **Tabulka A 1 – Tabulka A 9**. Amplitudové frekvenční charakteristiky všech měření plamene metanu nelze s ohledem na omezený rozsah tištěné verze disertační práce plně zařadit, lze je však nalézt v příloze elektronické verze disertační práce (strana 21 – strana 69).

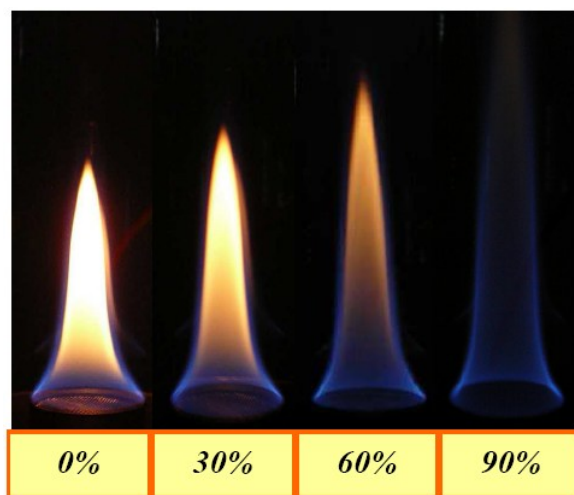
5.7.2 Výsledky snímkování plamene metanu

Skutečnost, že vlivem zvyšující se koncentrace hasicí látky a snižující se koncentrací kyslíku dochází ke snižování lokálních teplot v plameni a tím i intenzity vyzařování plamene, lze pozorovat rovněž z pořízených snímků plamene metanu. Pokles teplot v plameni těsně souvisí s barvou plamene. Rostoucí koncentrace hasicí látky a poklesy teplot výrazně ovlivňují procesy tvorby sazových částic v plameni. Pokud ke vzniku sazových částic v plameni dochází, je barva plamene bílá nebo žlutá (bílo-žlutá) a vzniká svítivý plamen. V případě, že ke vzniku sazových částic v plameni nedochází nebo je proces tvorby sazových částic limitován teplotou, je barva plamene modrá. Vzniká nesvítivý plamen a výrazně klesá intenzita vyzařování plamene.

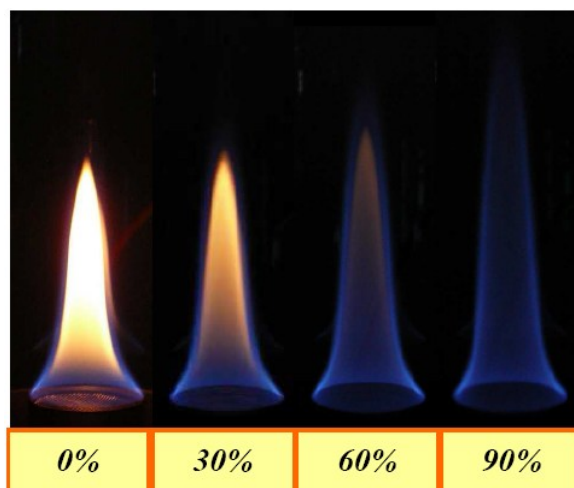
Uvedenou skutečnost zachycují u plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,metan} = 369,5 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ **Obrázek 41**, **Obrázek 42** a **Obrázek 43**. Obrázky byly získány ze sekvence snímků při měřeních plamene metanu bez a s přidavkem hasicích látek. Objemové koncentrace použitých hasicích látek (N_2 , CO_2 a Ar) ve směsi se vzduchem odpovídaly 30 %, 60 % a 90 % MEC příslušných hasicích látek. Tyto směsi byly aplikovány do obtoku plamene metanu v pohárkovém hořáku.



Obrázek 41: *Sekvence snímků plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,\text{metan}}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace N_2 v obtoku plamene pohárkového hořáku*



Obrázek 42: *Sekvence snímků plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,\text{metan}}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace Ar v obtoku plamene pohárkového hořáku*



Obrázek 43: *Sekvence snímků plamene metanu s objemovým průtokem $Q_{1,\text{metan}}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace CO_2 v obtoku plamene pohárkového hořáku*

Obdobný poznatek, který byl zaznamenán ve vztahu ke změně barvy plamene vyvolaný přidavkem hasící látky, je prezentován rovněž v práci *Takahashi et al.* [16]. Skutečnost, že barva plamene, a tudíž i procesy tvorby sazí v plameni závisí na teplotě, koresponduje také s poznatky dle *Warnatz et al.*[26], viz kapitola 4.3.2 disertační práce.

Ze sekvence snímku plamene metanu je dobře patrný také postupný růst výšky plamene se zvyšující se koncentrací hasící látky v obtoku plamene pohárkového hořáku. Uvedenou skutečnost lze vzhledem ke konstantní rychlosti přívodu paliva vysvětlit poklesem rychlosti difuze paliva i oxidačního prostředku do reakční zóny plamene v důsledku poklesu teplot v plameni i koncentrace oxidačního prostředku. Sekvence všech snímků plamene získané při měřeních metanu lze nalézt v **Příloze B** disertační práce.

5.7.3 Výsledky měření plamene *n*-heptanu

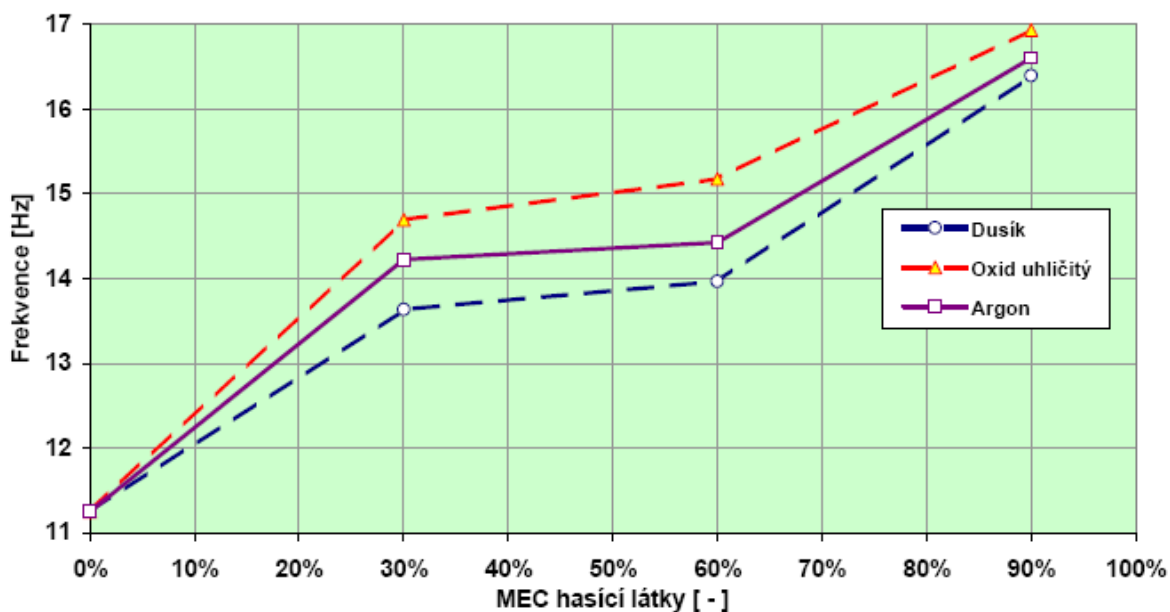
Z amplitudových a amplitudových frekvenčních charakteristik, které byly získány z dat experimentálních měření plamene *n*-heptanu, lze vyvodit následující poznatky:

- Frekvence oscilace plamene *n*-heptanu je funkcí koncentrace hasící látky v okolním prostředí plamene (v obtoku pohárkového hořáku).
- Frekvence oscilace plamene *n*-heptanu je funkcí koncentrace kyslíku v okolním prostředí plamene (v obtoku pohárkového hořáku).

- Vlivem rostoucí koncentrace hasicí látky (s fyzikálním mechanismem hašení) v okolním prostředí plamene klesá intenzita vyzařování plamene.
- Plamen osciluje se stejnou frekvencí v obou rozsazích vlnových délek použitých fotodetektorů.

Plamen volně odhořívajícího *n*-heptanu v pohárkovém hořáku lze klasifikovat jako difuzní turbulentní plamen s výraznou pravidelnou frekvencí oscilace. Pravidelné oscilace byly u plamene *n*-heptanu obtékaného v pohárkovém hořáku vzduchem a následně směsí vzduchu a hasicí látky identifikovány v obou rozsazích vlnových délek použitých fotodetektorů.

V případě vlivu koncentrace hasicí látky na frekvenci oscilace plamene *n*-heptanu lze z výsledků získaných experimentálním měřením konstatovat, že při zvyšující se koncentraci hasicí látky (s fyzikálním mechanismem hašení) v okolním prostředí plamene dochází u plamene *n*-heptanu ke zvyšování frekvence oscilace. Zmiňovanou skutečnost znázorňuje **Obrázek 44**. Uvedený obrázek prezentuje závislost frekvence oscilace plamene *n*-heptanu na přídávku procentuální hodnoty MEC hasicích látek, které byly aplikovány do obtoku plamene *n*-heptanu v pohárkovém hořáku.

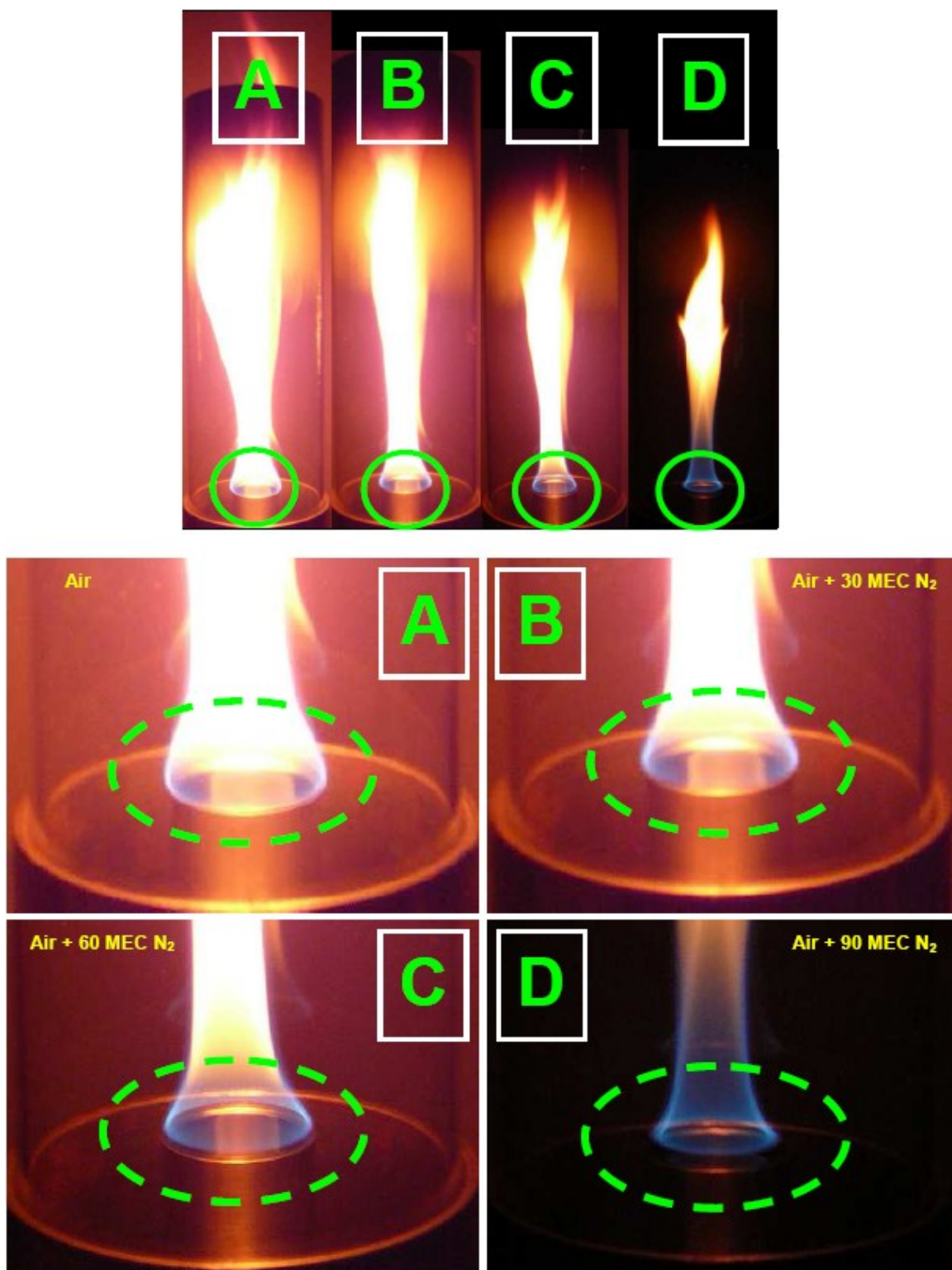


Obrázek 44: Vliv koncentrace hasicích látek na frekvenci oscilace plamene *n*-heptanu

Zvyšování frekvence oscilace plamene *n*-heptanu, vyvolané zvyšujícím se přídávkem procentuální hodnoty MEC hasicí látky a klesající koncentrace kyslíku

v okolním prostředí plamene (tj. v obtoku pohárkového hořáku), lze spojovat především se zmenšujícím se průměrem paty plamene. Tuto skutečnost ilustruje **Obrázek 45**. Prezentovaný obrázek zachycuje změny průměru i pozice paty plamene *n*-heptanu v daném případě za podmínek, kdy byl plamen obtékán vzduchem bez přídavku hasicí látky (**A**) a následně směsí vzduchu a dusíku s objemovou koncentrací odpovídající 30 % (**B**), 60 % (**C**) a 90 % (**D**) MEC dusíku pro *n*-heptan.

Ze sekvence snímků prezentovaných na **Obrázku 45** lze pozorovat nejen zmenšování průměru paty plamene, ale i změny pozice paty plamene vyvolané zvyšující se koncentrací hasicí látky a snižující se koncentrací kyslíku v okolním prostředí plamene. Přídavek hasicí látky a snížení koncentrace kyslíku způsobuje oddělení paty plamene od hrany pohárku, zmenšení jejího průměru a stabilizaci plamene v místě po směru proudění paliva, tj. vertikálně od hrany pohárku a horizontálně k ose pohárku. V případě, kdy objemová koncentrace dusíku v okolním prostředí plamene *n*-heptanu dosahovala 90 % MEC, osciloval plamen *n*-heptanu až několik milimetrů nad hranou pohárku a pata plamene měla výrazně redukovaný průměr. Skutečnost, že vlivem přídavku hasicí látky a poklesem koncentrace kyslíku dochází k posunu a redukci průměru paty plamene, koresponduje rovněž s poznatky dle *Takahashi et al.* [16].

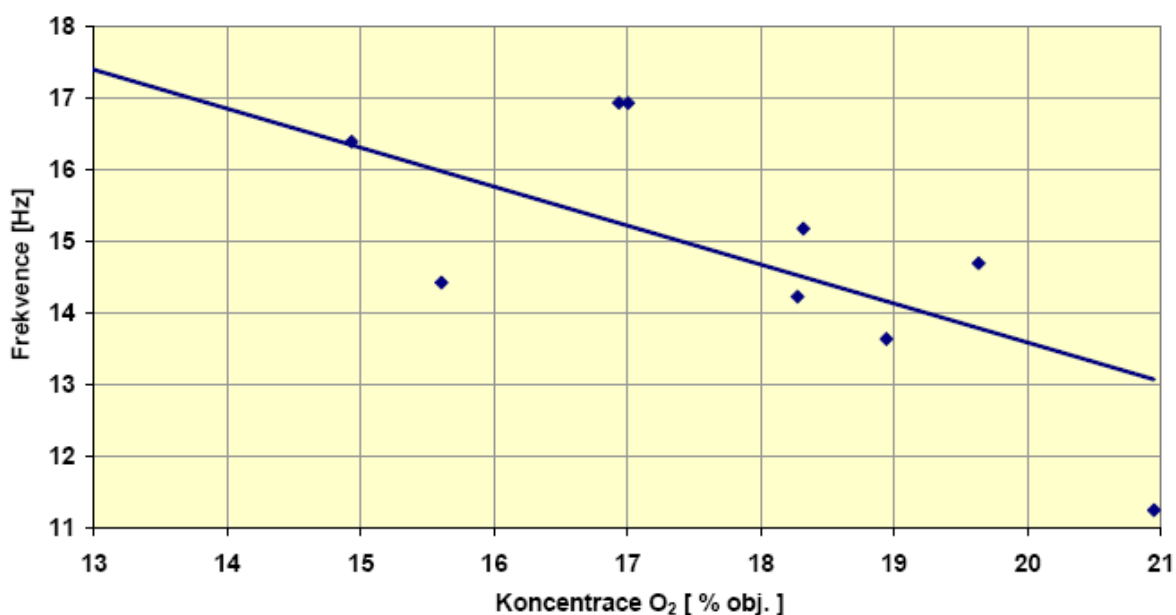


Obrázek 45: Změny průměru a pozice paty plamene n-heptanu v závislosti na přidavku MEC N₂ do obtoku plamene pohárkového hořáku

Závislost frekvence oscilace plamene na průměru paty plamene, tj. zvyšování frekvence oscilace při snižujícím se průměru paty plamene (průměru požáru), vykazuje rovněž shodu

s poznatky dle *Cetege et al.* [25], *Šarovar* [11], *Pagni* [28], *Thuillard* [29], viz kapitola 4.3 disertační práce.

Analogicky k výše uvedenému lze z výsledků získaných měření plamene *n*-heptanu vyvodit, že klesající koncentrace kyslíku v okolním prostředí plamene způsobuje snížení frekvence oscilace plamene. Tuto skutečnost znázorňuje **Obrázek 46**. Uvedený obrázek prezentuje trend závislosti frekvence oscilace plamene *n*-heptanu na koncentraci kyslíku v okolním prostředí plamene (tj. v obtoku pohárkového hořáku).



Obrázek 46: Trend závislosti frekvence oscilace plamene *n*-heptanu na koncentraci O₂ v obtoku pohárkového hořáku

Zmenšování průměru paty plamene i pozice paty plamene, vyvolané přidavkem hasicí látky a snížením koncentrace kyslíku v okolním prostředí plamene, lze spojovat se synergickou změnou fyzikálních a chemických dějů v přímé souvislosti s výměnou tepelné energie.

Synergii řady fyzikálních i chemických dějů, vyvolaných přidavkem hasicí látky a snížením koncentrace kyslíku v okolním prostředí plamene *n*-heptanu, lze velmi zjednodušeně popsat následujícím způsobem. Přidavkem hasicí látky a snížením koncentrace kyslíku dochází vlivem sdílení tepla do hasicí látky k poklesu teplot v plameni. Snižující se teploty v plameni i klesající koncentrace kyslíku limitují tvorbu, pyrolýzu a oxidaci radikálových prekurzorů nezbytných pro formování sází, vlivem čehož klesá množství vznikajících sazových částic. Poklesem množství vznikajících sazových

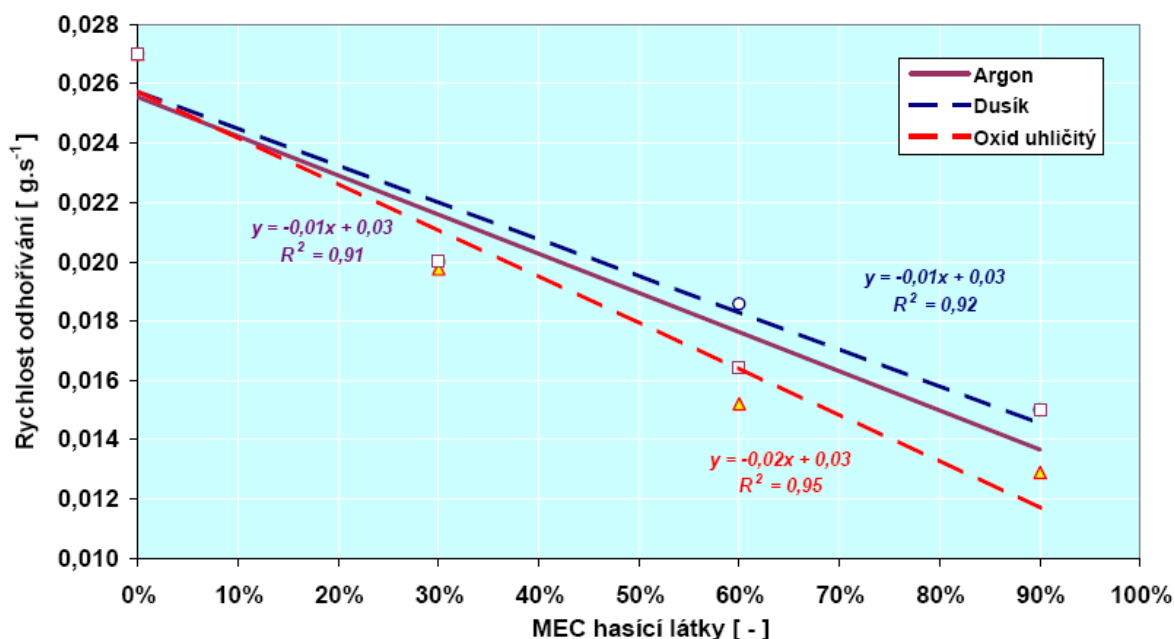
částic i teplot v plameni klesá množství tepla, které je dodáváno z plamene hořlavé látky. Následkem poklesu množství tepla, které je z plamene do hořlavé látky sdíleno především formou tepelné radiace (dominantně emisí sazovými částicemi), klesá rychlost tvorby par hořlavé kapaliny. Poklesem rychlosti tvorby par hořlavé kapaliny klesá koncentrace par hořlavé kapaliny nad hladinou kapaliny. Pokles koncentrace par hořlavé kapaliny společně s klesající koncentrací kyslíku v okolním prostředí i klesajícími teplotami v plameni způsobuje pokles rychlosti difuze a tím i pokles rychlosti odhořívání. Hořlavý soubor se tak vytváří pouze v omezené části nad hladinou hořlavé kapaliny, jenž se projevuje zmenšováním průměru i pozice paty plamene. Změna geometrických rozměrů plamene, tj. v tomto případě zmenšení průměru paty plamene, způsobuje zvýšení frekvence oscilace plamene. Výše popsanou synergii fyzikálních i chemických dějů vedoucích ke zvýšení frekvence oscilace plamene *n*-heptanu v důsledku zvýšení koncentrace hasící látky (snížení koncentrace kyslíku) v okolním prostředí plamene prezentuje ve zjednodušené podobě **Obrázek 47**.



Obrázek 47: Synergie fyzikálních a chemických dějů vyvolaná přidavkem hasící látky do okolního prostředí plamene *n*-heptanu

Synergii výše diskutovaných fyzikálních a chemických dějů vyvolaných přidavkem hasících látek a snížením koncentrace kyslíku v okolním prostředí plamene potvrzují

rovněž výsledky, které byly získány monitorováním hmotnostního úbytku *n*-heptanu za podmínek, kdy byl plamen obtékán vzduchem a následně směsí vzduchu a hasicí látky. Ze získaných výsledků lze konstatovat, že s rostoucí koncentrací hasicí látky a klesající koncentrací kyslíku v okolním prostředí plamene klesá rychlost odhořívání *n*-heptanu. Tuto skutečnost ilustruje **Obrázek 48**.



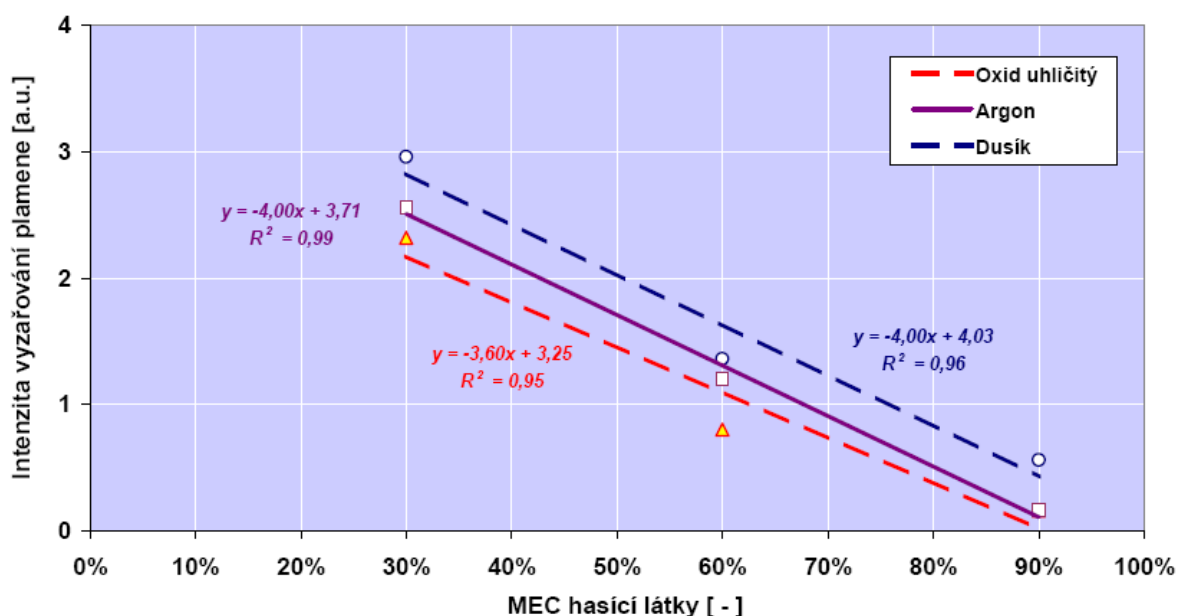
Obrázek 48: Vliv koncentrace hasicích látek na rychlosti odhořívání *n*-heptanu

Uvedený obrázek znázorňuje trendy závislosti rychlosti odhořívání *n*-heptanu na procentuálním přídávku MEC hasicích látek, které byly aplikovány do okolního prostředí plamene *n*-heptanu (tj. do obtoku v pohárkovém hořáku). Rychlost odhořívání je v uvedeném obrázku za daných podmínek prezentována průměrnou hmotnostní rychlostí odhořívání *n*-heptanu.

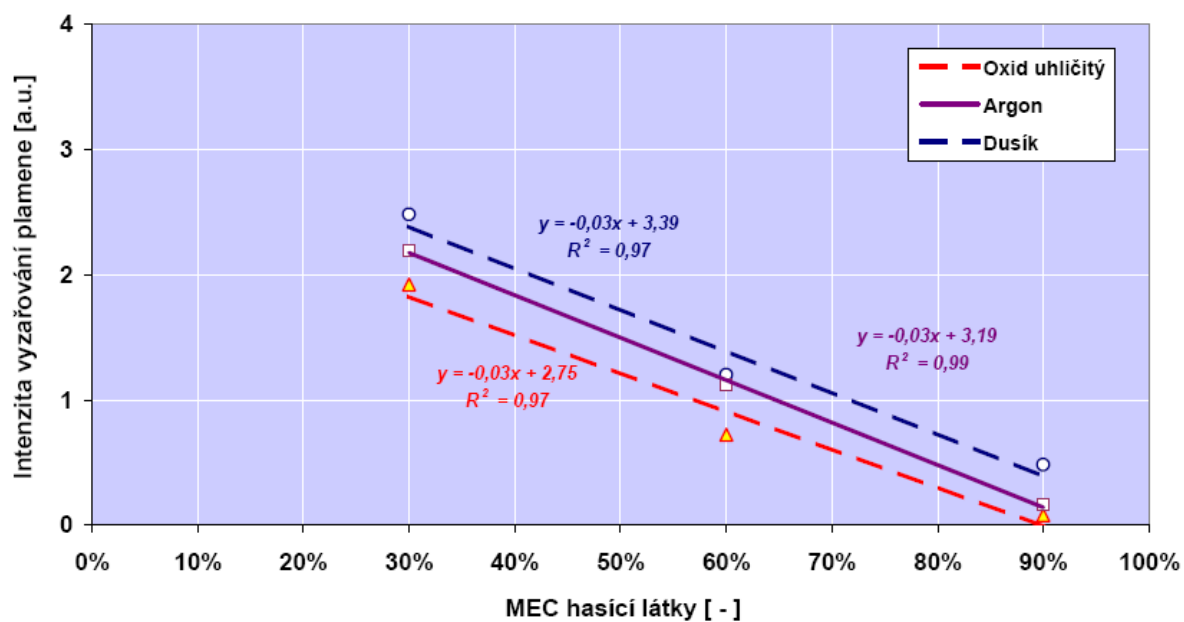
Obdobně lze synergii výše diskutovaných fyzikálních a chemických dějů demonstrovat závislostí intenzity vyzařování plamene na procentuálním přídávku MEC hasicích látek. Uvedenou skutečnost ilustrují u plamene volně odhořívajícího *n*-heptanu **Obrázek 49** a **Obrázek 50**. **Obrázek 49** znázorňuje trendy závislosti intenzity vyzařování plamene *n*-heptanu na procentuálním přídávku MEC hasicích látky, které byly aplikovány do okolního prostředí plamene *n*-heptanu. Plamen *n*-heptanu byl v tomto případě monitorován fotodetektozem PDA 10DT – EC (1200 – 2570 nm). **Obrázek 50** prezentuje tuto skutečnost pro případ, kdy byl plamen *n*-heptanu monitorován fotodetektozem

PDA 36A – EC (350 – 1100 nm). Na obou uvedených obrázcích je intenzita vyzařování plamene prezentována střední hodnotou amplitudy signálu z fotodetektoru v závislosti na procentuálním přídávku MEC hasicích látek v obtoku pohárkového hořáku. Příklad, kdy byl plamen obtékán pouze vzduchem bez přídávku hasicí látky, není vzhledem k rozdílné pozici fotodetektorů v uvedených obrázcích prezentován.

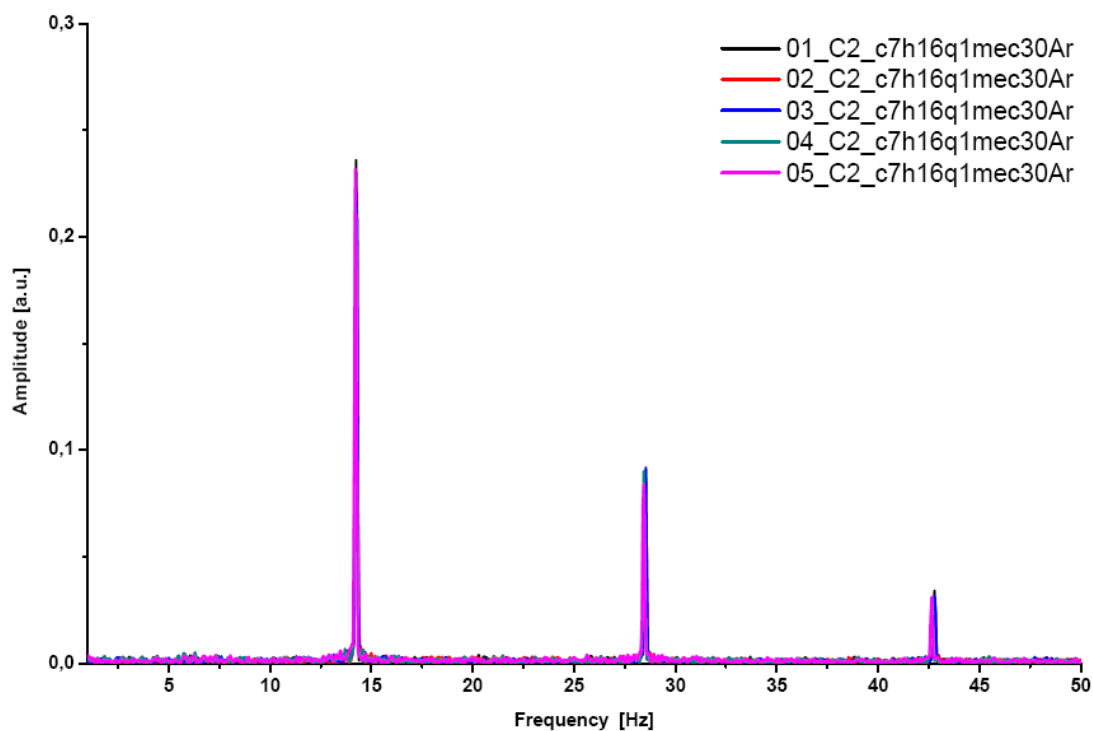
Pokles intenzity vyzařování plamene vyvolaný přidavkem hasicí látky a snížením koncentrace kyslíku v okolním prostředí plamene lze u oscilujícího plamene *n*-heptanu, vyvodit rovněž z amplitudových frekvenčních charakteristik. Zvyšující se koncentrace hasicí látky a klesající koncentrace kyslíku v okolním prostředí plamene způsobuje pokles amplitudy základní (hlavní) frekvence oscilace plamene. Tuto skutečnost ilustrují u plamene *n*-heptanu **Obrázek 51**, **Obrázek 52** a **Obrázek 53**. Uvedené obrázky znázorňují amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene *n*-heptanu, který byl obtékán směsí vzduchu a argonu s objemovou koncentrací odpovídající 30 %, 60 % a 90 % MEC argonu pro *n*-heptan. Pro snímání signálu z plamene byl v uvedeném případě použit fotodetektor PDA 36A – EC (350 – 1100 nm).



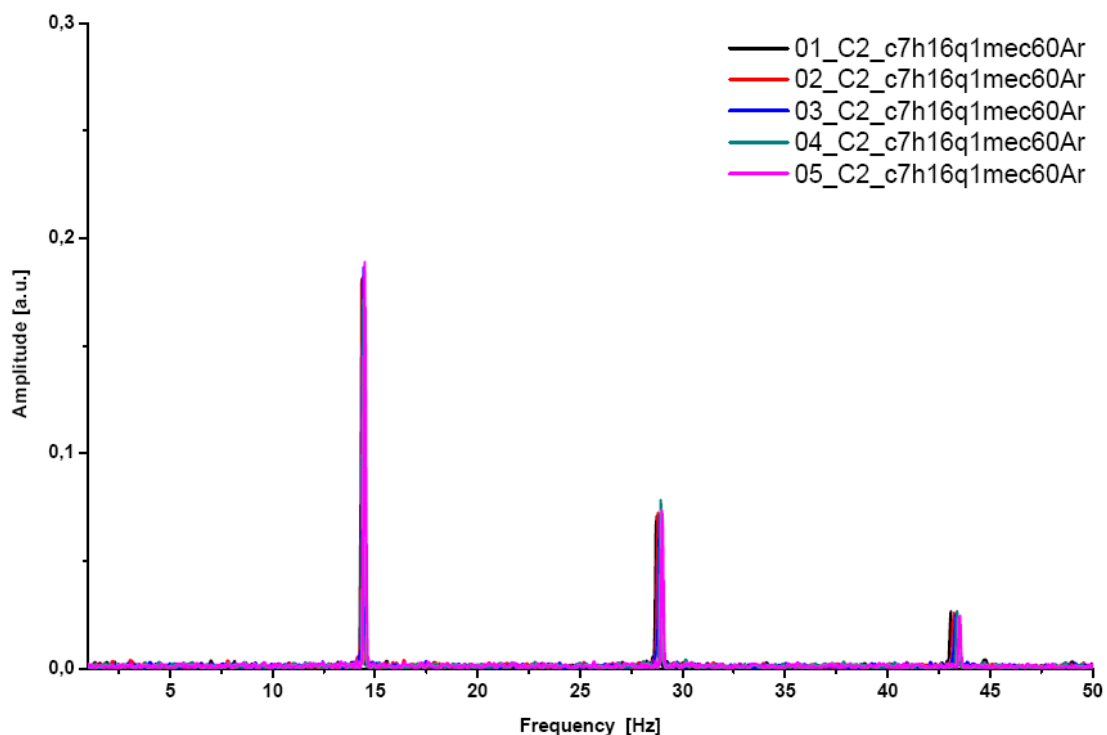
Obrázek 49: Trendy závislosti intenzity vyzařování plamene *n*-heptanu na procentu MEC hasicích látek v obtoku pohárkového hořáku (1200 – 2570 nm)



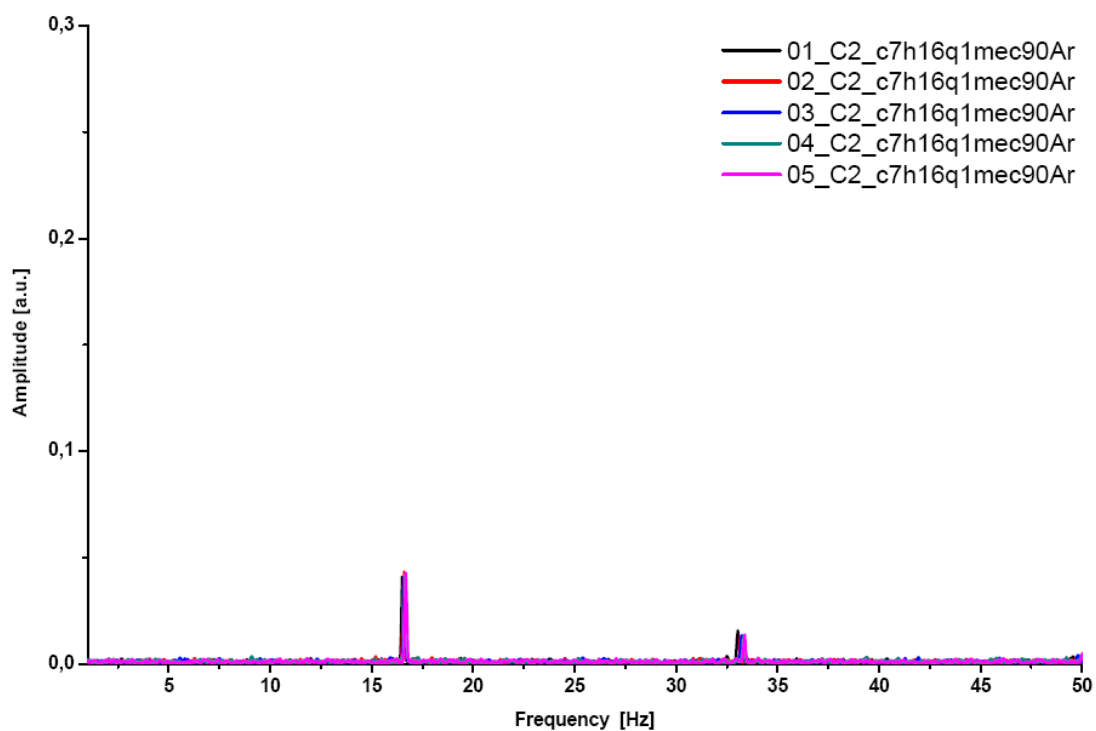
Obrázek 50: Trendy závislosti intenzity vyzářování plamene *n*-heptanu na procentu MEC hasicích látek v obtoku pohárkového hořáku (350 – 1100 nm)



Obrázek 51: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene *n*-heptanu s přidávkou 30 % MEC argonu do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)



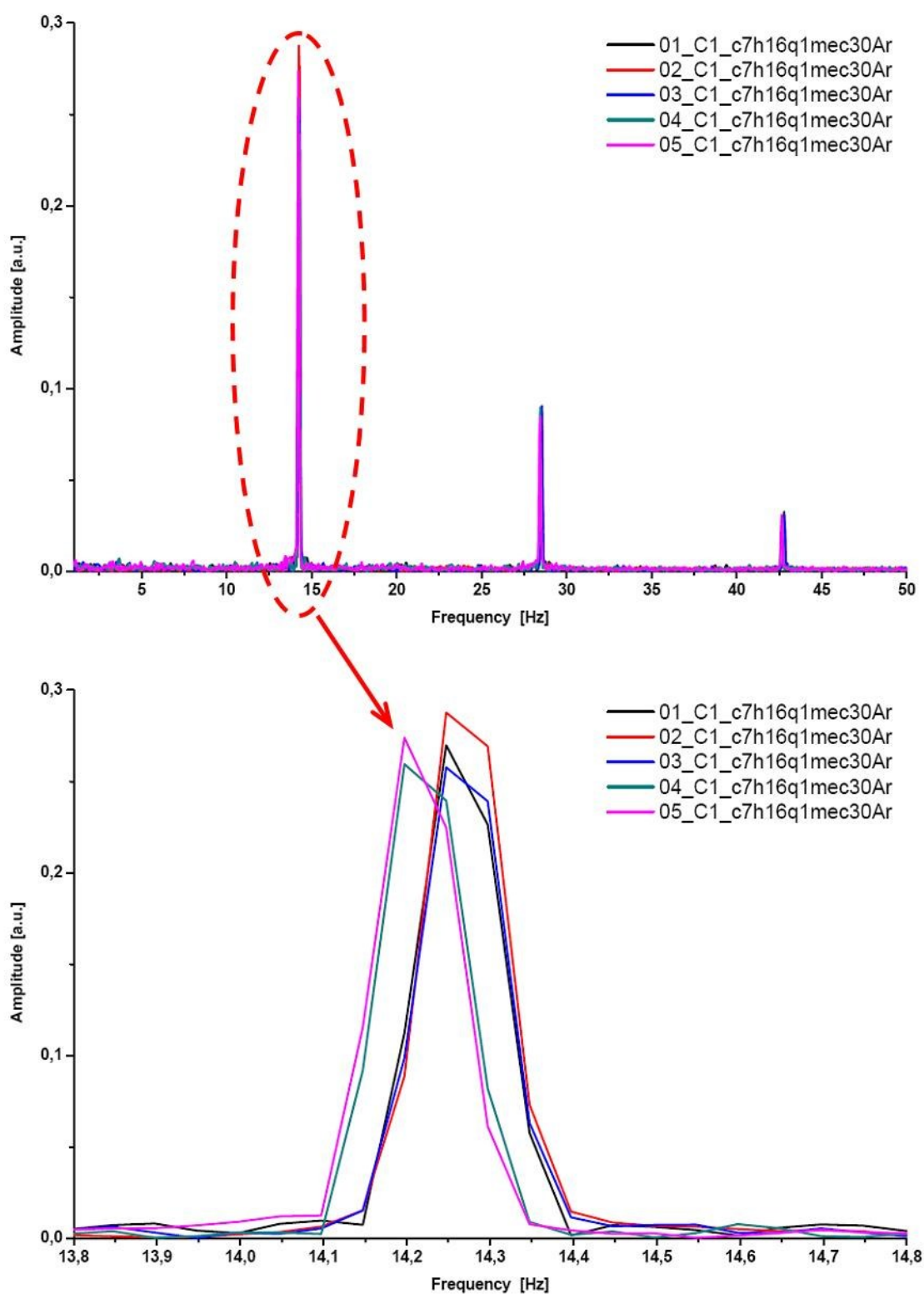
Obrázek 52: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene *n*-heptanu s přidavkem 60 % MEC argonu do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)



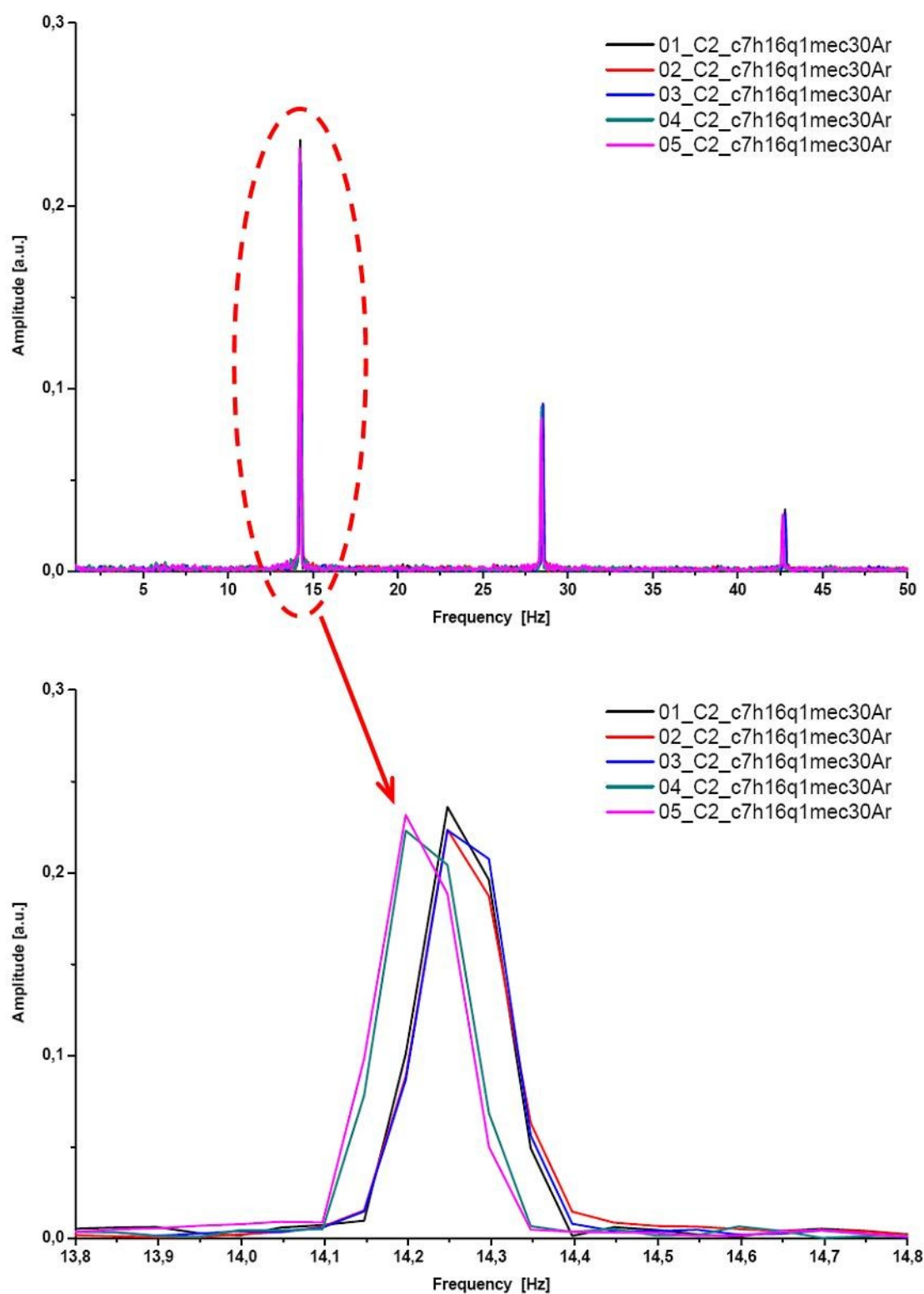
Obrázek 53: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene *n*-heptanu s přidavkem 90 % MEC argonu do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)

Skutečnost, že plamen *n*-heptanu osciloval se stejnou frekvencí v obou rozsazích vlnových délek použitých fotodetektorů, potvrzuje i v tomto případě již výše diskutovaný poznatek o nezávislosti frekvence oscilace plamene na rozsahu vlnových délek. Uvedený poznatek vykazuje shodu s poznatky získanými při měření plamene metanu a poznatky dle Šarovarova [11], [12].

Shodu frekvencí oscilace plamene *n*-heptanu identifikovanou při měřeních v rozsahu vlnových délek použitých fotodetektorů ilustrují **Obrázek 54** a **Obrázek 55**. **Obrázek 54** prezentuje amplitudové frekvenční charakteristiky získané sérií pěti měření plamene *n*-heptanu, který byl v pohárkovém hořáku obtékán směsí vzduchu a argonu. Koncentrace argonu v okolním prostředí plamene odpovídala 30 % MEC argonu pro *n*-heptan. Pro snímání signálu z plamene byl v tomto případě použitý fotodetektor PDA 10DT – EC (1200 – 2570 nm). **Obrázek 55** znázorňuje identická měření jako **Obrázek 54**, provedená však fotodetektorem PDA 36A – EC (350 – 1100 nm).



Obrázek 54: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene *n*-heptanu s přidávkou 30 % MEC argonu do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (1200 – 2570 nm)



Obrázek 55: Amplitudové frekvenční charakteristiky série pěti měření plamene *n*-heptanu s přidavkem 30 % MEC argonu do obtoku plamene v pohárkovém hořáku (350 – 1100 nm)

Souhrnné výsledky měření frekvence oscilace plamene volně odhořívajícího *n*-heptanu v pohárkovém hořáku jsou zaznamenány v **Příloze A** disertační práce, viz **Tabulka A 10 – Tabulka A 12**. Amplitudové frekvenční charakteristiky všech měření plamene *n*-heptanu nelze s ohledem na omezený rozsah tištěné verze disertační práce plně zařadit, lze je však nalézt v příloze elektronické verze disertační práce (strana 1 – strana 20).

6 Závěr

Hlavním cílem této disertační práce bylo ověřit možnost využití metod videodetekce plamene pro monitorování procesu hašení požáru za použití vybraných plynných hasicích látek. Dílčím cílem bylo zjistit, jak ovlivňuje koncentrace vybraných plynných hasicích látek (snížená koncentrace kyslíku) v atmosféře frekvenci oscilace plamene zvoleného plynného a kapalného paliva.

Pro naplnění uvedených cílů bylo použito metody laboratorního experimentu. S ohledem na použití metody laboratorního experimentu bylo nutné provést návrh a realizaci pro účely měření vhodně koncipované sestavy. Orientace na laboratorní experimentální měření vycházela z potřeby detailně studovat parametry plamene za přesně definovaných podmínek interakce nepředmíseného plamene a plynné hasicí látky. Dalším velmi důležitým faktem byl rovněž požadavek na zajištění vysoké míry reprodukovatelnosti provedených měření. Obě uvedené skutečnosti vytváří nezbytné předpoklady pro objektivní posouzení toho, zda lze metod videodetekce plamene využít pro účely monitorování procesu hašení s využitím plynných hasicích látek. Ve vztahu k realizaci protipožární ochrany objektů je možnost monitorování procesu hašení nezbytnou podmínkou řešení koordinace funkcí plynových stabilních hasicích zařízení.

Současné metody videodetekce plamene využívají algoritmů, které v obrázcích videa na základě analýzy barvy obrazových pixelů rozdělí snímek na oblasti s barvou plamene a na oblasti, které s plamenem nesouvisí. Oblasti s barvou plamene následně klasifikují na pohybující se a nepohybující se. Pohybující se oblasti s barvou plamene pak testují z pohledu časových změn intenzity jasové složky pixelů, tj. zda tato časová změna souvisí s plamenem ve vztahu k „očekávaným charakteristickým frekvencím oscilace plamene“ (okolo 10 Hz). Mezi důležité parametry plamene využívané při aplikacích metod videodetekce plamene tak patří především barva plamene, intenzita vyzařování plamene ve viditelné (VIS) oblasti spektra a frekvence oscilace plamene. Využití metod videodetekce plamene pro účely monitorování procesu hašení je proto výrazně závislé na tom, jak se výše uvedené parametry plamene mění v důsledku interakce plamene a hasicí látky.

Experimentální měření realizovaná v rámci této disertační práce prokázala, že vlivem zvyšující se koncentrace plynných hasicích látek (snižující se koncentrace kyslíku)

v okolní atmosféře plamene výrazně klesá množství sazových částic, které v plameni vznikají. Dle teoretických poznatků uvedených v disertační práci (viz kapitola 4.3.2) k tomu dochází v důsledku poklesu teplot v plameni, a s tím související změnou kinetiky chemických reakcí nezbytných pro vlastní tvorbu sazových částic. Limitovaná tvorba sazových částic v plameni vyvolává změnu barvy plamene. Plamen tak postupně s rostoucí koncentrací hasicí látky v okolní atmosféře mění svou barvu z typické oranžové, žluté či žluto/bílé (pro nepředmísený plamen) na oranžovo/modrou až modrou (viz Příloha B disertační práce). Pokles množství vznikajících sazových částic a teplot v plameni způsobuje pokles intenzity vyzařování plamene. Tato skutečnost se výrazně projevuje především ve viditelné oblasti spektra, kde se převážná část zářivé energie z plamene šíří prostřednictvím emise sazovými částicemi (viz kapitoly 5.7.1 a 5.7.3 disertační práce).

Realizovaným experimentálním měřením bylo rovněž prokázáno, že frekvence oscilace nepředmíseného turbulentního plamene je závislá na koncentraci hasicí látky, a tudíž i koncentraci kyslíku v okolní atmosféře plamene. U plynného paliva se frekvence oscilace plamene vlivem rostoucí koncentrace hasicí látky v okolní atmosféře snižuje. V případě kapalného paliva dochází vlivem rostoucí koncentrace hasicí látky ke zvyšování frekvence oscilace plamene.

V případě plynného paliva je pokles frekvence oscilace plamene vyvolán dominantně změnou hustoty okolní atmosféry plamene. Vlivem zvyšující se koncentrace hasicí látky dochází ke zvyšování hustoty okolní atmosféry plamene, jež způsobuje pokles frekvence oscilace plamene plynného paliva. U použitých plynných hasicích látek se tento fakt projevil při měření tak, že hasicí látky s vyšší relativní molekulovou hmotností ($M_r(\text{CO}_2) > M_r(\text{Ar}) > M_r(\text{N}_2)$) měly větší vliv na pokles frekvence oscilace plamene plynného paliva než látky s relativní molekulovou hmotností nižší. Podrobněji je tato problematika diskutována v kapitole 5.7.1 disertační práce.

U kapalného paliva je nárůst frekvence oscilace vyvolán především změnou geometrických rozměrů paty plamene. Vlivem zvyšující se koncentrace plynné hasicí látky v atmosféře dochází u plamene kapalného paliva ke zmenšování průměru paty plamene, jež způsobuje nárůst frekvence oscilace plamene. Zmenšení průměru paty plamene vyvolané zvýšením koncentrace hasicí látky přitom souvisí se synergií fyzikálních a chemických dějů probíhajících v plameni. Vlivem přídavku hasicí látky do okolní

atmosféry se v důsledku sdílení tepla do hasicí látky snižují lokální teploty v plameni (především v zóně reakce). Snižování teplot v plameni společně s poklesem koncentrace kyslíku vede ke změně kinetiky chemických reakcí a tím i množství tepla, které je z plamene sdíleno do hořlavé kapaliny. K tvorbě paliva z hořlavé kapaliny (par hořlavé kapaliny), proto dochází pouze na omezené ploše nad hladinou kapaliny a pata plamene má tedy menší geometrické rozměry (průměr). Podrobněji je tato problematika diskutována v kapitole 5.7.3 disertační práce.

Důležitým poznatkem, který byl získán experimentálním měřením ve vztahu k frekvenci oscilace plamene kapalného paliva, je rovněž to, že při koncentracích hasicích látek blízkých hodnotě minimální hasicí koncentrace (MEC) v okolní atmosféře jsou aktuální frekvence oscilace plamene výrazně vyšší než „očekávané charakteristické frekvence oscilace plamene“. Ve vztahu k metodám videodetekce převyšují hodnotu poloviny hodnoty frekvence vzorkování, tj. frekvenci 12,5 Hz.

Na základě poznatků získaných z výsledků laboratorních experimentálních měření i teoretických poznatků z oblasti detekce požáru lze konstatovat následující. Metody videodetekce plamene nelze při současném způsobu fungování algoritmů vyhodnocování požáru a technické úrovni kamer (snímkovací frekvencí záznamu) využít pro monitorování procesu hašení požáru za použití plyných hasicích látek. Z výsledků měření a diskuse (viz kapitoly 5.7 - 5.7.3) vyplývá, že všechny tři pracovní hypotézy vytýčené v kapitole 2 disertační práce byly potvrzeny.

Dosažené výsledky při studiu vlivu koncentrace plyných hasicích látek (tj. i snížené koncentrace kyslíku) na parametry plamene, mohou být uplatněny v rámci tvorby a úprav norem týkajících se navrhování elektrické požární signalizace. Za další přínos lze rovněž považovat využití získaných poznatků při inovaci předmětů orientovaných na problematiku požárně-bezpečnostních zařízení. Ve vztahu k vědnímu oboru, představují získané výsledky kvalitativní posun v úrovni teoretického poznání jevů, které provází procesy plamenného hoření vyvolané změnou podmínek v okolní atmosféře plamene.

Poznatky, získané při studiích plamene, hasicích látek i vzájemné interakce plamene a hasicí látky, byly v rámci několika příspěvků publikovány na konferencích mezinárodního významu a článků domácích i renomovaných zahraničních periodik [40],

[41], [42], [78], [79], [80], [82]. Experimentální sestava hořáku zahrnující rovněž systém přívodu médií, navržena a realizovaná pro potřeby laboratorních měření v rámci disertační práce byla evidována CTT VŠB - TU Ostrava jako funkční vzorek [66]. Data i informace získané měřením v rámci disertační práce byly využity při řešení několika projektů základního i aplikovaného výzkumu. V současné době jsou informace a poznatky získané měřením v rámci disertační práce využívány při řešení projektu LD 11012 – akce COST CM 0901 při validaci kombinovaných modelů chemické kinetiky a fluidní dynamiky pro simulaci procesů čistého spalování [41], [81] (viz kapitoly 8 a 9 disertační práce).

Conclusion

The principal aim of this Ph.D. thesis was to verify a possibility of employing video flame detection methods to monitor the process of fire suppression using selected gaseous extinguishing agents. A partial aim was to find out how the concentration of the selected gaseous extinguishing agents (decreased concentration of oxygen) in the atmosphere influenced the frequency of oscillation of the flame of a chosen gaseous and a chosen liquid fuel.

To accomplish the above-stated aims, a laboratory experiment method was employed. With regard to the application of the laboratory experiment method it was necessary to design and to build a setup satisfying the requirements of measurement. Orientation towards the laboratory experimental measurement was based especially on the need to study in detail flame parameters under exactly defined conditions of interactions between a non-premixed flame and a gaseous extinguishing agent. Another very important fact was the need to ensure a high rate of reproducibility of measurements done. Both the mentioned facts create necessary preconditions for an objective evaluation whether or not the video flame detection methods can be used for the purposes of monitoring of the suppression process using gaseous extinguishing agents. In relation to the fire protection of premises, the possibility of monitoring the suppression process is a necessary condition for a solution for the optimum coordination of functions of gaseous fixed extinguishing systems.

The present video flame detection methods utilize algorithms that divide video images, on the basis of analysis of colours of image pixels, into flame-coloured regions and regions not related to the flame. The flame-coloured regions are then classified as moving regions and stationary regions. The flame-coloured moving regions are tested from the point of view of time changes in the intensity of pixel luminance component, i.e. whether this time change is connected with the flame in relation to the “expected characteristic flame oscillation frequencies” (about 10 Hz). To the important flame parameters used in the application of video flame detection methods, especially the flame colour, intensity of flame radiation in the visible (VIS) region of the spectrum and flame oscillation frequency thus belong. The utilization of video flame detection methods for the purposes of

monitoring the suppression process is then considerably dependent on changes in the above-mentioned flame parameters induced by interactions between the flame and the extinguishing agent.

Experimental measurements made in the framework of this Ph.D. thesis have proved that by the increasing concentration of gaseous extinguishing agents (decreasing concentration of oxygen) in the surrounding atmosphere of the flame, the amount of soot particles formed in the flame decreases markedly. According to the theoretical findings stated in the Ph.D. thesis (see chapter 4.3.2), this is caused by a drop in flame temperature and a related change in the kinetics of chemical reactions that are necessary to the proper formation of soot particles. A restrained formation of soot particles in the flame brings about a change in flame colour. The flame thus gradually changes its colour with the growing concentration of the extinguishing agent in the surrounding atmosphere from typical orange, yellow or yellow/white (non-premixed flame) to orange/blue to blue (see Appendix B to the Ph.D. thesis). A reduction in the amount of formed soot particles and a drop in temperature in the flame cause a decrease in the intensity of flame radiation. This fact manifests itself markedly above all in the VIS region of the spectrum, where the prevailing part of radiant energy spreads from the flame by means of emission of soot particles (see chapters 5.7.1 and 5.7.3 of the Ph.D. thesis).

By the made experimental measurement it has also been proved that the frequency of oscillation of the non-premixed turbulent flame depends on the concentration of the extinguishing agent, and thus also on the concentration of oxygen in the surrounding atmosphere of the flame. In the case of the gaseous fuel, the flame oscillation frequency decreases owing to the growing concentration of the extinguishing agent in the surrounding atmosphere. In the case of the liquid fuel, the flame oscillation frequency increases owing to the growing concentration of the extinguishing agent.

In the case of the gaseous fuel, a decrease in the flame oscillation frequency is caused dominantly by a change in the density of surrounding atmosphere of the flame. Owing to the increasing concentration of the extinguishing agent, the density of surrounding atmosphere of the flame increases, which causes a decrease in the frequency of oscillation of the gaseous fuel flame. In the used gaseous extinguishing agents this fact exhibits itself during measurement by the greater influence of high relative molecular mass

extinguishing agents ($M_r(\text{CO}_2) > M_r(\text{Ar}) > M_r(\text{N}_2)$) on a decrease in the frequency of oscillation of the gaseous fuel flame than low relative molecular mass substances. These problems are discussed in more detail in chapter 5.7.1 of the Ph.D. thesis.

In the case of the liquid fuel, an increase in the oscillation frequency is induced especially by a change in the geometric dimensions of the flame base. The increasing concentration of the gaseous extinguishing agent in the atmosphere causes in a case of the liquid fuel flame a decrease in the diameter of the flame base, which leads to an increase in the flame oscillation frequency. The decrease in the diameter of the flame base induced by an increase in the concentration of the extinguishing agent is connected directly with synergy between physical and chemical processes taking place in the flame. By adding the extinguishing agent to the surrounding atmosphere, local temperatures in the flame (mainly in the reaction zone) decrease as a result of heat transfer to the extinguishing agent. The decrease in temperatures in the flame together with a decrease in the concentration of oxygen leads to a change in the kinetics of chemical reactions and thus the amount of heat that is transferred from the flame to the combustible liquid. For this reason, the fuel is produced from the combustible liquid (combustible liquid vapours) merely on a limited area above the liquid level and the flame base thus has smaller geometric dimensions (diameter). These issues are discussed in more details in chapter 5.7.3 of the Ph.D. thesis.

An important finding, which was acquired by experimental measurement in relation to the frequency of liquid fuel flame oscillation, is the fact that at concentrations of extinguishing agents close to the value of minimum extinguishing concentration (MEC) in the surrounding atmosphere, the actual frequencies of flame oscillation are markedly higher than “expected characteristic frequencies of flame oscillation”. In relation to the video detection methods, they exceed the value equal to half the value of the frequency of sampling, i.e. frequency of 12.5 Hz.

On the basis of both findings obtained from the results of laboratory experimental measurements and theoretical findings in the area of fire detection, the following can be stated. At the present way of functioning of algorithms for fire assessment and at the technical level of cameras (frame rate of recording), the video flame detection methods cannot be used for monitoring the process of fire suppression using gaseous extinguishing

agents. From measurement results and discussion (see chapters 5.7- 5.7.3) it follows that all three working hypotheses outlined in chapter 2 have been confirmed.

Results achieved during the study of influence of the concentration of gaseous extinguishing agents (i.e. also decreased oxygen concentrations) on flame parameters can be applied in the framework of drafting and modifying standards concerning fire alarm and detection system design. As another benefit the utilization of acquired findings in innovation of subjects oriented to the problems of fire-safety equipment can be considered. In relation to the field of science, the obtained results represent a qualitative shift in the level of theoretical knowledge of phenomena that accompany the processes of flame combustion induced by a change in conditions in the surrounding atmosphere of the flame.

The findings obtained from the studies of the flame, extinguishing agents and interaction between the flame and the extinguishing agents were included in several papers presented at conferences of international significance and in articles published in national and international reputable periodicals [40], [41], [42], [78], [79], [80], [82]. The experimental setup of the burner including also a medium supply system, designed and built for the needs of laboratory measurement in the framework of the Ph.D. thesis, was registered by the Technology Transfer Centre of VŠB – TU Ostrava as functional sample [66]. Data and information acquired by measurement as part of the Ph.D. thesis were used in dealing with several projects of basic and applied research. At present, information and findings obtained by measurement within of the Ph.D. thesis are used in the project LD 11012 – action COST CM 0901 in the validation of combined models of chemical kinetics and fluid dynamics for the simulation of processes of clean combustion [41], [81] (see chapters 8 and 9 of the Ph.D. thesis).

7 Soupis bibliografických citací

- [1] ISO 14520 - 1. *Gaseous fire-extinguishing systems - Physical properties and system design*. Geneve: International Organization for Standardization, 2006.
- [2] NFPA 2001. *Standard for Clean Agent Fire Extinguishing Systeme*. Quincy: National Fire Protection Association, 2008.
- [3] SANTORO, R. J.; SEMERJIAN, H. G.; DOBBINS, R. H. Soot particle measurements in diffusion flames. *Combustion and Flame*, 1983, **51**, s. 203 - 218.
- [4] HARTUNG, G.; HULT, J.; KAMINSKI, C. F. A flat flame burner for the calibration of laser thermometry techniques. *Measurement, Science Technology*, 2006, **17**, s. 2485 - 2493.
- [5] NDUBIZU, C. C.; ANANTH, R.; TATEM, P. A. MOTEVALLI, V. On water mist fire suppression mechanisms in a gaseous diffusion flame. *Fire Safety Journal*, 1998, **31**, s. 253 - 276.
- [6] HAMINS, A.; TREES, D.; SESHADRI, K.; CHELLIAH, H. K. Extinction of Nonpremixed Flames with Halogenated Suppressants. *Combustion and Flame*, 1994, **99**, s. 221 - 230.
- [7] MACDONALD, M. A.; JAYAWEERA, T. M.; FISHER, E. M.; GOULDIN, F. C. Inhibition of Nonpremixed Flames by Phosphorus-Containing Compounds. *Combustion and Flame*, 1999, **116**, s. 166 - 176.
- [8] GÜLDER, Ö. L.; THOMSON, K. A.; SNELLING, D. R. Effect of fuel nozzle material properties on soot formation and temperature field in coflow laminar diffusion flames. *Combustion and Flame*, 2006, **144**, s. 426 - 433.
- [9] CHESKIS, S.; GOLDMAN, A. Laser diagnostics of trace species in low-pressure flat flame. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2009, **35**, s. 365 - 382.
- [10] SKLÁRNÝ KAVALIER, a.s. *Katalog Labo 2008* [online]. Czech Republic : 2008 [cit. 2011-1-29]. KAVALIER, Laboratorní a technické sklo. Dostupné z WWW: <<http://www.kavalier.cz/external/files/2542/Katalog%20Labo%20%202008.pdf>>.
- [11] ŠAROVAR, F. I. *Principy postroeniâ ustrojstv i sistem avtomatičeskoj požarnoj signalizacii*. Moskva: Strojizdat, 1983, 335 s. il.
- [12] ŠAROVAR, F. I. *Metody rannego obnaruženiâ zagoraniy*. Moskva: Strojizdat, 1988, 336 s. il. ISBN 5-274-00177-7
- [13] IMORGUS. *Amplified Photodetectors : PDA 10DT-EC* [online]. 2009 - 2011, May 29, 2009 [cit. 2011-02-10]. Katalog produktů Thorlabs. Dostupné z WWW: <<http://www.thorlabs.de/thorProduct.cfm?partNumber=PDA10D>>.
- [14] IMORGUS. *Amplified Photodetectors : PDA 36A-EC* [online]. 2009 - 2011, May 29, 2009 [cit. 2011-02-10]. Katalog produktů Thorlabs. Dostupné z WWW: <<http://www.thorlabs.de/thorProduct.cfm?partNumber=PDA36A>>.
- [15] ČSN ISO 9 (01 0185). *Informace a dokumentace – Transliterace cyrilice do latinky – slovanské a neslovanské jazyky*. Praha: Český normalizační institut, 2002, 17 s.

- [16] TAKAHASHI, F.; LINTERIS, G.T.; KATTA, V.R. Extinguishment mechanisms of coflow diffusion flames in a cup-burner apparatus. *Proceedings of the Combustion Institute* [online]. 2007, **31**, s. 2721 - 2729 [cit. 2011-02-22]. Dostupný z WWW: <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire07/PDF/f07046.pdf>>.
- [17] SENECA, J.A. Flame extinguishing in the cup-burner by inert gases. *Fire Safety Journal* [online]. 2005, **40**, s. 579 - 591, [cit. 2011-02-22]. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=1651370271&_sort=r&_st=13&view=c&_acct=C000044516&_version=1&_urlVersion=0&_userid=822117&md5=3a7add88ce4ed0963ccd66840bb4182c&searchtype=a>.
- [18] ŠTROCH, P.; ORLÍKOVÁ, K. *Hasební látky*. Vyd.1. Žilina: EDIS – vydavateľstvo Žilinskej univerzity, 2010, 119 s. ISBN 978-80-554-0186-7.
- [19] WAGNER[®]. *Wagner-uk.com : Fire prevention through extraction of oxygen* [online]. c2010 [cit. 2011-02-24]. How does OxyReduct[®] work. Dostupné z WWW: <<http://www.wagner-uk.com/fire-prevention/oxyreductr-operation/index.html?L=2>>.
- [20] BRONKHORST[®] HIGH – TECH. *FLUIDAT[®] Flow calculations*, [online]. Ver. 2.05 Netherlande, 2011, [cit. 2011-02-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.fluidat.com>>.
- [21] PITTS, W.M. Improved understanding of thermal agent fire suppression mechanisms from detailed chemical kinetic modeling with idealized surrogate agents. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2009, **32**, s. 2599 - 2606.
- [22] GOTODA, H.; KAWAGUCHI, S.; SASO, Y. Experiments on dynamical motion of buoyancy-induced flame instability under different oxygen concentration in ambient gas. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2008, Volume **32** (Issue 8), s. 1759 - 1765.
- [23] KATTA, V.R.; TAKAHASHI, F.; LINTERIS, G.T. Suppression of cup-burner flames using carbon dioxide in microgravity. *Combustion and Flame*. 2004, **137**, s. 506 - 522.
- [24] LIDE, D. R. *Handbook of chemistry and physics*. 77th edition. United States of America : CRC Press, Inc., 1996, 2324 s. ISBN 0-8493-0477-6.
- [25] CETEGEN, B.M.; AHMED, T.A. Experiments on the periodic instability of buoyant plumes and pool fires, *Combustion and Flame*. 1993, **93**, s. 157 - 184.
- [26] WARNATZ, J.; MAAS, U.; DIBBLE, R.W. *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. Heidelberg, Berlin, Berkeley: Springer, 1995, 265 s. ISBN 3-540-60730-7.
- [27] HAMINS, A.; YANG, J.C.; KASHIWAGI, T. An Experimental Investigation of the Pulsation Frequency of Flames. In *Proceedings of the 24th Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh: The Combustion Institute, 1992, s. 1695 - 1702.
- [28] PAGNI, P.J. Pool fire vortex shedding frequencies, *Applied Mechanics Review*, 1990, **43**, s. 153 - 170.

- [29] Thuillard, M. A new flame detector using the latest research on flames and fuzzy-wavelet algorithms, *Fire Safety Journal*, 2002, **37**, s. 371 - 380.
- [30] MCBRIDE, B.J.; ZEHE, M.J.; GORDON, S. *NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species : NASA TP-2002-211556* [online]. Washington : National Aeronautics and Space Administration Washington, 2002, 1/25/2011 [cit. 2011-04-27]. Dostupné z WWW: <<http://gltrs.grc.nasa.gov/reports/2002/TP-2002-211556.pdf>>.
- [31] ČSN 650102. *Chemie – Obecná pravidla chemického názvosloví, označování čistoty chemikálií, vyjadřování koncentrace, veličin a jednotek*. Praha: Český normalizační institut, Září 2006, 16 s.
- [32] BENGTSSON, L.G. *Enclosure fire*. First published. Anna-Lena Goransson, Bo Svensson. Per Hardestam and other. Björn Karlsson. Karin Rehman. NRS Tryckeri, Huskvarna, Sweden: Swedish Rescue Services Agency, 2001, 192 s. Raddnings Verket. ISBN 91-7253-263-7. U30-647/05.
- [33] BALOG, K. *Hasiace látky a jejich technologie*. 1. vydání. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2004. SPBI Spektrum: Červená řada, **37**. 171 s. ISBN 80-86634-49-3.
- [34] WILLIAMS, F.A. *Combustion Theory The Fundamental Theory of Chemically Reacting Flow Systems (2nd Edition)*. Menlo Park: Benjamin/Cummings, 1985.
- [35] SCHREIBER, H.M.; PORST, P. *Hasební látky: Chemicko-fyzikální pochody při hoření a hašení, Díl I*. 1. vydání. Horst Berensmeier. Ladislav Adánek. Arthur Gartner. Praha: Československý svaz požární ochrany, 1972, 174 s.
- [36] NEVRLÝ, V. *Strategie a metody modelování požáru nádrže kapalných uhlovodíků*. Ostrava, 2009. 110 s. Disertační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava,, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Vedoucí práce prof. RNDr. Pavel Danihelka, CSc.
- [37] QUINTIERE, J.G. *Fundamentals of Fire Phenomena*. 1. Edition. USA: John Wiley & Sons, Ltd, 2006. 439 s. ISBN 0-470-09113-4. Dostupné z: <http://frazermacdonald.com/fire/resources/books/Fundamentals%20of%20Fire%20Phenomena-Quintere.pdf>
- [38] TIESZEN, S.; NICOLETTE, V.; GRITZO, L.; HOLNET, J.; MURRAY, D.; MOYAAND, J. *Vortical Structures in Pool Fires: Observation, Speculation, and Simulation*. SANDIA REPORT SAND96-2607 UC-722. Albuquerque, 1996.
- [39] WANG, L. *Detailed chemistry, soot, and radiation calculations in turbulent reacting flows*. Pennsylvania, 2004. 197 s. Dostupné z: <https://etda.libraries.psu.edu/paper/6203/1481>. Doctoral Thesis. Pennsylvania State University, Department of Mechanical and Nuclear Engineering. Thesis advisors Dr. Dan Haworth.
- [40] BITALA, P.; NEVRLÝ, V.; STRIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; GRIGOROVÁ, E. Hydrodynamické nestability plamene zkoumané v laboratorním měřítku. In ŠVEC, J. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava: Řada bezpečnostní inženýrství*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická

univerzita Ostrava, 2010. s. 11 - 19. Řada bezpečnostní inženýrství, č. 1, ročník V. ISBN 978-80-248-2317-1. ISSN 1801-1764.

- [41] BITALA, P.; NEVRLÝ, V.; STŘIŽÍK, M.; DLABKA, J.; GRIGOROVÁ, E.; KOČVÁŘOVÁ, P.; KOZUBKOVÁ, M.; BOJKO, M.; ZELINGER, Z.; FERUS, M.; KUBÁT, P.; CIVIŠ, S. Oscillatory behaviour of cup-burner flame inhibited by inert gases studied for model validation purposes. *Cleaner Combustion 2011: CM 0901: Detailed Chemical Models for Cleaner Combustion 1st Topical Workshop: Methods for model simplification, evaluation and improvement*, 28th June, 2011, School of Engineering, Cardiff University, UK.
- [42] BITALA, P.; NEVRLÝ, V.; STŘIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; GRIGOROVÁ, E. Hydrodynamické nestability plamene zkoumané v laboratorním měřítku. In ŠENOVSKÝ, M. *Požární ochrana 2010: Sborník přednášek XIX. ročníku mezinárodní konference*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. s. 37 - 40. ISBN 978-80-7385-087-6. ISSN 1803-1803.
- [43] CETEGEN, B.M.; DONG, Y. Experiments on the instability modes of buoyant diffusion flames and effects of ambient atmosphere on the instabilities. *Experiments in Fluids*, 2000, **28**, s. 546 - 558.
- [44] KATTA, V.R.; ROQUEMORE, W.M.; MENON, A.; LEE, S.Y.; SANTORO, R.J.; LITZINGER, T.A. Impact of soot on flame flicker. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, **32**, s. 1343 - 1350.
- [45] DEDERICH, A.S. *Flamelet Modelling of Soot Formation in Diffusion Flames*. Lund, 2004. 149 s. ISBN 91-628-6127-1. ISSN 1102-8246. Doctoral thesis. Lund university, Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology. Thesis supervisor prof. Göran Holmstedt.
- [46] MCENALLY, C.S.; PFEFFERLE, L.D.; ATAKAN, B.; KHOSE-HOINGHAUS, K. Studies of aromatic hydrocarbon formation in flames: Progress towards closing the fuel gap. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, **32**, s. 247 - 294.
- [47] LAHAYE, J.; PRADO, G. *Particulate Carbon Formation During Combustion, Morphology and Internal Structure of Soot and Carbon Blacks*, Plenum Press, 3 edition, 1981.
- [48] MEGARIDIS, C.M.; DOBBINS, R.A. Soot aerosol dynamics in a laminar ethylene diffusion flame, *Twenty-Second Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, Pittsburgh, 1988, s. 353 - 362.
- [49] MCKINNON, J.T.; HOWARD, J.B., The roles of pah and acetylene in soot nucleation and growth, *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, Pittsburgh, 1992, s. 965 - 971.
- [50] XIONG, Z.; CABALLERO, R.E.; WANG, H.; FINN, A.M.; PENG, P. Video Fire Detection – Techniques and Applications in Fire Industry, *Multimedia Content Analysis, Signals and Communication Technology*, Springer Science+Business Media, 2009, s. 1 - 13, DOI: 10.1007/978-0-387-76569-3_12
- [51] CELIK, T.; DEMIREL, H. Fire Detection in Video Sequences using a Generic Color Model, *Fire Safety Journal*, 2009, Volume **44**, Issue 2, s. 147 - 158.

- [52] FUJIWARA, N.; TERADA, K. Extraction of smoke region using fractal coding. *IEEE International Symposium on Communication and Information Technology*, 2004, Volume 2, s. 659 - 662.
- [53] KOPILOVIC, I.; VAGVOLGYI, B.; SZIRANYI, T. Application of panoramic annular lens for motion analysis tasks: surveillance and smoke detection. *Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition*, 2000, Volume 4, s. 714 - 717.
- [54] TÖREYIN, B.U.; DEDEOGLU, Z.; CETIN, A.E. Wavelet based real-time smoke detection in video. *EUSIPCO'05*, 2005.
- [55] VINCENTE, J.; GUILLEMANT, P. An image processing technique for automatically detecting forest fire. *International Journal of Thermal Sciences*, 2002, Volume 41, s. 1113 - 1120.
- [56] GRECH-CINI, H.J. Smoke Detection, *US Patent No. US6844818B2*, 2005.
- [57] DEDEOGLU, Y.; TOREYIN, B.U.; GUDUKBAY, U.; ENIS CETIN, A. Real-Time Fire and Flame Detection in Video. *IEEE 30th International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Philadelphia, 2005, s. 669 - 672.
- [58] HEALEY, G.; SLATER, D.; LIN, T.; DRDA, B.; GOEDEKE, D. A system for real-time fire detection. *Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1993, s. 605 - 606.
- [59] LIU, C.B.; AHUJA, N. Vision Based Fire Detection. *Pattern Recognition, 17th International Conference*, Cambridge UK, 2004, Volume 4, s. 134 - 137.
- [60] PHILLIPS III, W.; SHAH, M.; LOBO, N.V. Flame recognition in video. *Pattern Recognition Letters*, 2002, Volume 23, Number 1 - 3, s. 319 - 327.
- [61] PRIVALOV, G.; SHAKHUTDINOV, A.Z. Fire suppression system and method. *US Patent No. US6975225B2*, 2005.
- [62] FOJTEK, A. Vybrané kapitoly z fyziky. 1.vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010, 176 s. ISBN 978-80-248-2170-2.
- [63] CHEN, J.; HE, Y.; WANG, J. Multi - feature fusion based fast video flame detection. *Building and Environment*, 2010. 45, s. 1113 - 1122.
- [64] DIVAKARAN, A. *Multimedia Content Analysis: Theory and Applications*. Princeton, USA: Springer Science + Business Media, 2009, 353 s. ISBN 978-0-387-76567-9; DOI 10.1007/978-0-387-76569-3.
- [65] BEBČÁK, P. *Vliv požárně bezpečnostních zařízení na požární bezpečnost stavebních objektů*. Ostrava, 2004. 98 s. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslava Netopilová, CSc.
- [66] BITALA, P.; NEVRLÝ, V.; DANIHELKA, P. Experimentální hořák. *Funkční vzorek ev. č.: 054/09-09-2011_F*, 2011.
- [67] BITALA, P. Koordinace požárně bezpečnostních zařízení. In ŠENOVSKÝ, M. *SPEKTRUM*. 2008, ročník 8, 1/2008. Příloha časopisu SPEKTRUM. s. 1 - 15. ISSN 1211-6920.

- [68] Česká republika. Vyhláška č. 246/2001 Sb.: Vyhláška Ministerstva vnitra o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci). In: *Sbírka zákonů č. 246/2001*. 2001, Částka 95.
- [69] GRANIER, W.J. Automatic on-off sprinkler head. *US Patent No. 3,749,176*, 1973.
- [70] MEARS, J.W.; O'BRIEN, W.J. On-off sprinkler. *US Patent No. 3,757,866*, 1973.
- [71] PIECZYKOLAN, G.S. Automatic on-off sprinkler head. *US Patent No. 4,553,602*, 1985.
- [72] VARI, P. On-off type sprinkler, *US Patent No. 5,303,778*, 1994.
- [73] FISCHER, A.; MÜLLER, C. A simulation technique for the design of multi sensor based fire detection algorithms. *Proceeding of the 10th International Conference on Automatic Fire Detection AUBE'95 in Duisburg, Germany*, 1995, ISBN 3-930911-46-9.
- [74] PFISTER, P.J. Multisensor/Multicriteria Fire Detection: A new Trend Rapidly Becomes State of the Art, *Fire Technology*, 1997, **33**, s. 115 - 139.
- [75] THUILLARD, M. New Methods for Reducting the Number of False Alarms in Fire Detection Systems, *Fire Technology*, 1994, **30**, s. 250 - 268.
- [76] BITALA, P.; JÁNOŠÍK, L.; CHUDOVÁ, D.; DUBČÁKOVÁ, R.; DUDÁČEK, A. Bodové hlásiče teplot a kouře a metody predikce jejich doby reakce. In ŠENOVSKÝ, M. *Požární ochrana 2008: Sborník přednášek XVII. ročníku mezinárodní konference*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. s. 49 - 59. ISBN 978-80-7385-040-1.
- [77] BITALA, P. Vliv velikosti vodních kapiček na podmínky v místě požáru. In ŠENOVSKÝ, M.. *SPEKTRUM*. 2009, ročník 9, 2/2009, s. 14 - 18. ISSN 1211-6920.
- [78] NEVRLÝ, V.; STŘIŽÍK, M.; BITALA, P.; ZELINGER, Z. Laser Spectroscopy of Transient Carbon Species in the Context of Soot Formation. In L. Nemes and S. Irle (Eds.). *Spectroscopy, Dynamics and Molecular Theory of Carbon Plasmas and Vapors*. World Scientific Publishing. 2011. 536 s. ISBN 978-981-283-764-6.
- [79] STŘIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; KUBÁT, P.; KOZUBKOVÁ, M.; NEVRLÝ, V.; SIKOROVÁ, L.; CHMIELOVÁ, I.; BERNATÍK, A.; HERECOVÁ, L.; ZAVILA, O.; BITALA, P.; GRIGOROVÁ, E.; KADERÁBEK, P.; WILD, J.; SKŘÍNSKÝ, J.; HEJZLAR, T.; MÍČEK, D.; JANEČKOVÁ, R.; DRÁBKOVÁ, S.; JELÍNKOVÁ, R.; ŠENOVSKÝ, M.; DANIHELKOVÁ, K.; ČADIL, J.; ŘÍHA, J. *Final Report COST Action 729: Assessing and managing nitrogen fluxes in the atmosphere-biosphere system in Europe*. In BLEEKER, A. & ERISMAN, J.W. (Eds.). The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2011. s. 85 - 98. ISBN 978-90-817039-1-8.
- [80] FERUS, M.; CIVIŠ, S.; KUBELÍK, P.; NEVRLÝ, V.; BITALA, P.; GRIGOROVÁ, E.; STŘIŽÍK, M.; KUBÁT, P.; ZELINGER, Z. Time-resolved Fourier Transform Emission Spectroscopy of Fire Extinguishing Agents CF₃Br and CF₃CFHCF₃ in Pulsed Electrical Discharge. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. Volume **31**, April 2011, SPRINGER, 2011. ISSN 1572-8986.

- [81] BITALA, P.; NEVRLÝ, V.; STŘIŽÍK, M.; DLABKA, J.; GRIGOROVÁ, E.; KOZUBKOVÁ, M.; BOJKO, M.; ZELINGER, Z.; FERUS, M.; KUBÁT, P.; CIVIŠ, S. Investigatin of a cup-burner flame influenced by gaseous thermal agents: SCIENTIFIC REPORT. In ABIÁN, M. & ALZUETA, M. U. *Cleaner Combustion 2011: CM 0901: Detailed Chemical Models for Cleaner Combustion 2nd Annual Meeting*. Zaragoza (Spain): Copy Center Digital, 2011. s. 140 - 142. ISBN 978-84-615-3062-5, Z-2951-2011.
- [82] NEVRLÝ, V.; BITALA, P.; STŘIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; DANIHELKA, P.; KOLLÁRIK, T.; GRIGOROVÁ, E.; JÁNOŠÍK, L.; JELÍNKOVÁ, R.; MIKOCZY, A.; FILIPI, B.; DUDÁČEK, A. Infrared Imaging of Uninhibited Cup-Burner Flame. In *Book of Abstract: 4th European Combustion Meeting*. Vienna/Austria: Verlag ProcessEng Engineering GmbH, 2009. Infrared Imaging of Uninhibited Cup-Burner Flame. Poster session, PS19. s. 317. ISBN 978-3-902655-06-6

8 Seznam vlastních publikací

(Kapitola – monografie):

- [A.1] NEVRLÝ, V.; STŘIŽÍK, M.; **BITALA, P.**; ZELINGER, Z. Laser Spectroscopy of Transient Carbon Species in the Context of Soot Formation. In L. Nemes and S. Irle (Eds.). *Spectroscopy, Dynamics and Molecular Theory of Carbon Plasmas and Vapors*. World Scientific Publishing. 2011. 536 s. ISBN 978-981-283-764-6.
- [A.2] STŘIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; KUBÁT, P.; KOZUBKOVÁ, M.; NEVRLÝ, V.; SIKOROVÁ, L.; CHMIELOVÁ, I.; BERNATÍK, A.; HERECOVÁ, L.; ZAVILA, O.; **BITALA, P.**; GRIGOROVÁ, E.; KADEŘÁBEK, P.; WILD, J.; SKŘÍNSKÝ, J.; HEJZLAR, T.; MÍČEK, D.; JANEČKOVÁ, R.; DRÁBKOVÁ, S.; JELÍNKOVÁ, R.; ŠENOVSKÝ, M.; DANIHELKOVÁ, K.; ČADIL, J.; ŘÍHA, J. *Final Report COST Action 729: Assessing and managing nitrogen fluxes in the atmosphere-biosphere system in Europe*. In BLEEKER, A. & ERISMAN, J.W. (Eds.). The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2011. s. 85 - 98. ISBN 978-90-817039-1-8.
- [A.3] **BITALA, P.**; LICHOROBIEC, S.; VESELÝ, V. *Bezpečnostní technologie, systémy a management I*. 1. vydání. Zlín: VerBuM, 2011. Elektromechnické detektory narušení, s. 38 - 55. ISBN 978-80-87500-05-7.

(Články – impaktované časopisy):

- [A.4] HERECOVÁ, L.; HEJZLAR, T.; PAVLOVSKÝ, J.; MÍČEK, D.; ZELINGER, Z.; KUBÁT, P.; JANEČKOVÁ, R.; NEVRLÝ, V.; **BITALA, P.**; STŘIŽÍK, M.; KLOUDA, K.; CIVIŠ, S. CO₂-laser photoacoustic detection of gaseous n-pentylacetate. In Miller, T. A., *Journal of Molecular Spectroscopy*, Volume **256**, Issue 1, July 2009, Pages 109 - 110. ELSEVIER, 2009. ISSN 0022-2852.
- [A.5] FERUS, M.; CIVIŠ, S.; KUBELÍK, P.; NEVRLÝ, V.; **BITALA, P.**; GRIGOROVÁ, E.; STŘIŽÍK, M.; KUBÁT, P.; ZELINGER, Z. Time-resolved Fourier Transform Emission Spectroscopy of Fire Extinguishing Agents CF₃Br and CF₃CFHCF₃ in Pulsed Electrical Discharge. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. Volume **31**, April 2011, SPRINGER, 2011. ISSN 1572-8986.
- [A.6] NEVRLÝ, V.; **BITALA, P.**; STŘIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; WILD, J.; KUBÁT, P.; JÁNOŠÍK, L.; GRIGOROVÁ, E.; SKŘÍNSKÝ, J.; HEJZLAR, T.; BAUDIŠOVÁ, B. Instabilities of cup-burner flame studied by infrared imaging at 3.9 μ m spectral band. *Combustion & Flame*. (odesláno k recenznímu řízení).

(Články – recenzované časopisy):

- [A.7] **BITALA, P.**; NEVRLÝ, V.; STŘIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; GRIGOROVÁ, E. Hydrodynamické nestability plamene zkoumané v laboratorním měřítku. In ŠVEC, J. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava: Řada bezpečnostní inženýrství*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010. s. 11 - 19. řada bezpečnostní inženýrství, č. 1 – 1010, ročník V. ISBN 978-80-248-2317-1. ISSN 1801-1764.

- [A.8] GRIGOROVÁ, E.; ZELINGER, Z.; STŘIŽÍK, M.; BAILLEUX, S.; WLODARCZAK, G.; **BITALA, P.**; NEVRLÝ, V. Využití mikrovlnné spektroskopie pro studium reaktivních látek. In ŠVEC, J. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava: Řada bezpečnostní inženýrství*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2009. s. 27 - 32. řada bezpečnostní inženýrství, č. 1 – 2009, ročník IV. ISBN 978-80-248-2143-6. ISSN 1801-1764.
- [A.9] **BITALA, P.** Vliv velikosti vodních kapiček na podmínky v místě požáru. In ŠENOVSKÝ, M. *SPEKTRUM*. 2009, ročník 9, 2/2009, s. 14 - 18. ISSN 1211-6920.
- [A.10] **BITALA, P.** Zranění a úmrtí civilistů při požárech v obytných a bytových domech. In ŠENOVSKÝ, M. *Požární ochrana 2009: Sborník přednášek XVIII. ročníku mezinárodní konference*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009. s. 36 - 46. ISBN 978-80-7385-067-8. ISSN 1803-1803.
- [A.11] **BITALA, P.** Koordinace požárně bezpečnostních zařízení. In ŠENOVSKÝ, M. *SPEKTRUM*. 2008, ročník 8, 1/2008. Příloha časopisu SPEKTRUM. s. 1 - 15. ISSN 1211-6920.
- [A.12] NEVRLÝ, V.; **BITALA, P.**; STŘIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; DANIHELKA, P.; ZAVILA, O.; KOLLÁRIK, T. Laboratorní studie plamene jako nástroj pro lepší porozumění průmyslovým požárům a jejich atmosférickým emisím. In ŠVEC, J. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava: číslo 1, ročník III, řada bezpečnostní inženýrství*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. s. 79 - 88. ISBN 978-80-248-1920-4. ISSN 1801-1764.
- [A.13] NEVRLÝ, V.; **BITALA, P.**; NEVRLÁ, P.; STŘIŽÍK, M. Knowledge-based emergency planning for storage tank farms. *COMMUNICATIONS: SCIENTIFIC LETTERS OF THE UNIVERSITY OF ŽILINA*. 2008, vol. 10, no. 1, s. 10 - 15. ISSN 1335-4205.
- [A.14] **BITALA, P.**; JÁNOŠÍK, L.; CHUDOVÁ, D.; DUBČÁKOVÁ, R.; DUDÁČEK, A. Bodové hlásiče teplot a kouře a metody predikce jejich doby reakce. In ŠENOVSKÝ, M. *Požární ochrana 2008: Sborník přednášek XVII. ročníku mezinárodní konference*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. s. 49 - 59. ISBN 978-80-7385-040-1.
- [A.15] JÁNOŠÍK, L.; **BITALA, P.**; KUCHAR, R.; TULIS, J. Testování bioradaru LifeLocator® v zahraničí a u jednotky PO HZS MSK. In ŠENOVSKÝ, M. *Požární ochrana 2008: Sborník přednášek XVII. ročníku mezinárodní konference*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. s. 226 - 235. ISBN 978-80-7385-040-1.

(Příspěvky – konference):

- [A.16] **BITALA, P.**; NEVRLÝ, V.; STŘIŽÍK, M.; DLABKA, J.; GRIGOROVÁ, E.; KOZUBKOVÁ, M.; BOJKO, M.; ZELINGER, Z.; FERUS, M.; KUBÁT, P.; CIVIŠ, S. Investigatin of a cup-burner flame influenced by gaseous thermal agents: SCIENTIFIC REPORT. In ABIÁN, M. & ALZUETA, M. U. *Cleaner Combustion 2011: CM 0901: Detailed Chemical Models for Cleaner Combustion 2nd Annual Meeting*. Zaragoza (Spain): Copy Center Digital, 2011. s. 140 - 142. ISBN 978-84-615-3062-5, Z-2951-2011.

- [A.17] **BITALA, P.**; NEVRLÝ, V.; STŘIŽÍK, M.; DLABKA, J.; GRIGOROVÁ, E.; KOČVÁŘOVÁ, P.; KOZUBKOVÁ, M.; BOJKO, M.; ZELINGER, Z.; FERUS, M.; KUBÁT, P.; CIVIŠ, S. Oscillatory behaviour of cup-burner flame inhibited by inert gases studied for model validation purposes. *Cleaner Combustion 2011: CM 0901: Detailed Chemical Models for Cleaner Combustion 1st Topical Workshop: Methods for model simplification, evaluation and improvement*, 28th June, 2011, School of Engineering, Cardiff University, UK.
- [A.18] ZELINGER, Z.; NEVRLÝ, V.; KUBÁT, P.; BERGER, P.; ČERNÝ, A.; ENGST, P.; **BITALA, P.**; JANEČKOVÁ, R.; GRIGOROVÁ, E.; ČADIL, J.; KADERÁBEK, P.; DRÁBKOVÁ, S.; KOZUBKOVÁ, M.; HARTMAN, D.; STŘIŽÍK, M. Selected approaches supporting a better description of emission sources of reactive nitrogen. *Nitrogen & Global Change: Key Findings – Future Challenges*, 11 - 15 April, 2011, Edinburgh International Conference Center, UK.
- [A.19] STŘIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; KEDER, J.; NEVRLÝ, V.; KUBÁT, P.; BERGER, P.; ČERNÝ, A.; ENGST, P.; ČERNÝ, E.; **BITALA, P.**; PRAKS, P.; KADERÁBEK, P.; ČADIL, J.; JANEČKOVÁ, R.; GRIGOROVÁ, E. Influence of urban agglomeration as a significant source of reactive nitrogen on regional distribution of tropospheric ozone during summer photochemical episodes REMOTE SENSING AND LOCAL MEASUREMENTS. *Nitrogen & Global Change: Key Findings – Future Challenges*, 11 - 15 April, 2011, Edinburgh International Conference Center, UK.
- [A.20] **BITALA, P.**; NEVRLÝ, V.; STŘIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; GRIGOROVÁ, E. Hydrodynamické nestability plamene zkoumané v laboratorním měřítku. In ŠENOVSÝ, M. *Požární ochrana 2010: Sborník přednášek XIX. ročníku mezinárodní konference*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. s. 37 - 40. ISBN 978-80-7385-087-6. ISSN 1803-1803.
- [A.21] CHUDOVÁ, D.; **BITALA, P.**; BRÁDKA, S. Studium šíření chemické látky v objektu. In ŠENOVSÝ, M. *Požární ochrana 2010 : Sborník přednášek XIX. ročníku mezinárodní konference*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. s. 102 - 105. ISBN 978-80-7385-087-6. ISSN 1803-1803
- [A.22] SKŘÍNSKÝ, J.; HEJZLAR, T.; BAUDIŠOVÁ, B.; NEVRLÝ, V.; **BITALA, P.**; ZELINGER, Z. Photoacoustic spectrometry of ethanol – Influence of the optimal integration time by turbulences. *The 4th International Conference SECURE SLOVAKIA and EU*. 11 - 12 November, 2010, Košice, Slovak republic. s. 496 - 499. ISBN 978-80-89282-44-9.
- [A.23] KOČVÁŘOVÁ, P.; KOZUBKOVA, M.; BOJKO, M.; NEVRLÝ, V.; ZELINGER, Z.; FERUS, M.; KUBÁT, P.; CIVIŠ, S.; **BITALA, P.**; GRIGOROVÁ, E.; STŘIŽÍK, M. CFD modeling applied in investigation of cleaner combustion processes, *The 1st Annual Meeting CM0901 – Detailed Chemical Models for Cleaner Combustion*. 15 - 16 September, 2010, Nancy, France.
- [A.24] NEVRLÝ, V.; **BITALA, P.**; STŘIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; DANIHELKA, P.; KOLLÁRIK, T.; GRIGOROVÁ, E.; JÁNOŠÍK, L.; JELÍNKOVÁ, R.; MIKOCZY, A.; FILIPI, B.; DUDÁČEK, A. Infrared Imaging of Uninhibited Cup-Burner Flame. In *Book of Abstract: 4th European Combustion Meeting*. Vienna/Austria: Verlag ProcessEng Engineering GmbH, 2009. Infrared Imaging of Uninhibited Cup-Burner Flame. Poster session, PS19. s. 317. ISBN 978-3-902655-06-6.

- [A.25] HERECOVÁ, L.; HEJZLAR, T.; PAVLOVSKÝ, J.; MÍČEK, D.; ZELINGER, Z.; KUBÁT, P.; NEVRLÝ, V.; **BITALA, P.**; STŘIŽÍK, M.; KLOUDA, K.; CIVIŠ, S. The CO₂-Laser Photo-acoustic Detection of Gaseous n-Pentylacetate. In *Book of Abstracts of the 20th International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy*. In BLUDSKÝ, O., PRACNA, P., URBAN, Š. The 20th International Conference on High Resolution Molecular Spectroscopy. Praha: ICT Press, 2008. Poster session, F48. s. 164. ISBN 978-80-7080-689-0.
- [A.26] CHUDOVÁ, D.; **BITALA, P.** Nebezpečí a následky způsobené mimořádnou událostí s přítomností nebezpečné látky v městské zástavbě. In ŠENOVSKÝ, M. *Nebezpečné látky 2008: Sborník přednášek II. ročníku konference*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. s. 40 - 46. ISBN 978-80-7385-042-5.
- [A.27] **BITALA, P.**; CHUDOVÁ, D. Integrace a koordinace vybraných požárně bezpečnostních zařízení v objektech. In *Mladá veda: Veda a krízové situácie*. Žilina: [s. n.], 2008. s. 1 - 11. ISBN 978-80-8070-896-2.
- [A.28] **BITALA, P.**; JÁNOŠÍK, L.; KUCHAR, R.; TULIS, J. Nasazení bioradaru v praxi u jednotek PO. In *Mladá veda: Veda a krízové situácie*. Žilina: [s. n.], 2008. s. 1 - 9. ISBN 978-80-8070-896-2.
- [A.29] **BITALA, P.**; NEVRLÝ, V.; STŘIŽÍK, M.; ZELINGER, Z.; DANIHELKA, P.; ZAVILA, O.; JÁNOŠÍK, L.; KOLLÁRIK, T. Laminar Flame Experiments: Are They Valuable When Studying Industrial Fires and Explosions?. In BERNATÍK, A. *Safety Engineering 2008: The 2nd International Scientific Conference*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, FBI, 2008. s. 26 - 32. ISBN 978-80-248-1848-1. ISSN 1801-1764.
- [A.30] **BITALA, P.**; CHUDOVÁ, D. Živelné pohromy a minimalizace jejich následků v letech 1997–2006 v povodí Odry. In *Ochrana území postihnutých ničivými přírodními pohromami: zborník z medzinárodnej konferencie*. Štrbské pleso: [s. n.], 2007. s. 149 - 161. Technická univerzita vo Zvolene, 2007, Žilinská univerzita v Žilíně, 2007. ISBN 978-80-228-1803-2.
- [A.31] BRADÁČOVÁ, I.; **BITALA, P.** Požáry v panelových bytových domech. In *Sborník příspěvků ze středoevropské Central European Energy Efficiency and Renewable Energy Sources Conference*. Konference CEEERES 07, 22. a 23. 2. 2007 Výstaviště INCHEBA EXPO Praha. Energy Consulting České Budějovice, 2007, s. 3 - 5.

(Příspěvky – jiné kategorie):

- [A.32] **BITALA, P.**; NEVRLÝ, V.; DANIHELKA, P. Experimentální hořák. *Funkční vzorek ev. č.: 054/09-09-2011_F*, 2011.

9 Participace na projektech

- [B.1] *“Komplexní interakce mezi přírodními ději a průmyslem s ohledem na prevenci závažných havárií a krizové řízení”* (projekt č. SPII 1a10 45/07 podporovaný Ministerstvem životního prostředí ČR); 2007 - 2011.
- [B.2] *“Laboratoř pokročilých spektroskopických technik v bezpečnostním inženýrství”* (projekt č. 1111/2008/A/a Fondu rozvoje vysokých škol, spolufinancován Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR), 2008.
- [B.3] *“Infračervená termografie a numerická simulace plamene laboratorního pohárkového hořáku”* (projekt IGS č. 023/2101/BI 023 8011 podporovaný VŠB - TUO, Fakultou bezpečnostního inženýrství), 2008.
- [B.4] *“Infračervené snímkování plamene pohárkového hořáku”* (projekt IGS č. 023/2101/BI0239021 podporovaný VŠB - TUO, Fakultou bezpečnostního inženýrství), 2009.
- [B.5] *“Studie amoniaku pomocí PAS a FTIR spektroskopie fluorovaných látek (freonů)”* (projekt IGS č. 023/2101/BI0239021 podporovaný VŠB - TUO, Fakultou bezpečnostního inženýrství), 2009.
- [B.6] *“Vliv antropogenních aktivit na atmosférické cykly dusíkatých sloučenin, jejich management a legislativa”* (projekt č. OC 186 - akce COST 729, spolufinancován Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR); 2007 - 2010.
- [B.7] *“Infračervená diagnostika procesů hoření a hašení”* (projekt SGS č. SP/2010148 podporovaný VŠB - TUO, Fakultou bezpečnostního inženýrství), 2010.
- [B.8] *“Vliv teroristického útoku na vybrané průmyslové technologie s nebezpečím výbuchu prachu”* (projekt BV č. VG20102015059 podporovaný Ministerstvem vnitra ČR); 2010 - 2015.
- [B.9] *“Kombinované modely chemické kinetiky a fluidní dynamiky pro simulace procesů čistšího spalování”* (projekt č. LD 11012 – akce COST CM 0901, spolufinancován Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR), 2011 - 2013.
- [B.10] *“Vytváření speciálních tenkých vrstev UV-VIS-NIR transparentních dielektrik pomocí ablace repetičním kapilárním XUV laserem”* (Projekt GAČR č. GA P108/11/1312); 2011 - 2015.

10 Příloha A: Sumární tabulky výsledků měření

Tabulka A 1: Výsledky měření plamene metanu při výtokové rychlosti paliva $v_1 = 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ s přidavkem dusíku

Měření	CH ₄ v ₁ q ₁				CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30N ₂				CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60N ₂				CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90N ₂			
	Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2	
	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f
	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Průměr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Rozptyl	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Směrodatná odchylka	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Legenda: X – oscilace nebyla naměřena, hodnotu nelze stanovit.

f – frekvence oscilace plamene

S(f) – amplituda signálu na frekvenci f

1, 2, 3, 4, 5 – pořadové číslo měření za daných podmínek

C1 – měřicí kanál C1 osciloskopu LeCroy (PDA 10 DT – EC, 1200 – 2570 nm)

C2 – měřicí kanál C2 osciloskopu LeCroy (PDA 36 A – EC, 350 – 1100 nm)

Tabulka A 2: Výsledky měření plamene metanu při výtokové rychlosti paliva $v_1 = 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ s přidavkem oxidu uhličitého

Měření	$\text{CH}_4 v_1 q_1$				$\text{CH}_4 v_1 q_1 \text{MEC30CO}_2$				$\text{CH}_4 v_1 q_1 \text{MEC60CO}_2$				$\text{CH}_4 v_1 q_1 \text{MEC90CO}_2$			
	Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2	
	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f
	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Průměr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Rozptyl	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Směrodatná odchylka	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Legenda: X – oscilace nebyla naměřena, hodnotu nelze stanovit.

f – frekvence oscilace plamene

S(f) – amplituda signálu na frekvenci f

1, 2, 3, 4, 5 – pořadové číslo měření za daných podmínek

C1 – měřicí kanál C1 osciloskopu LeCroy (PDA 10 DT – EC, 1200 – 2570 nm)

C2 – měřicí kanál C2 osciloskopu LeCroy (PDA 36 A – EC, 350 – 1100 nm)

Tabulka A 3: Výsledky měření plamene metanu při výtokové rychlosti paliva $v_1 = 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ s přidavkem argonu

Měření	CH ₄ v ₁ q ₁				CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30Ar				CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60Ar				CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90Ar			
	Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2	
	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f
	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Průměr	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Rozptyl	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Směrodatná odchylka	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Legenda: X – oscilace nebyla naměřena, hodnotu nelze stanovit.

f – frekvence oscilace plamene

S(f) – amplituda signálu na frekvenci f

1, 2, 3, 4, 5 – pořadové číslo měření za daných podmínek

C1 – měřicí kanál C1 osciloskopu LeCroy (PDA 10 DT – EC, 1200 – 2570 nm)

C2 – měřicí kanál C2 osciloskopu LeCroy (PDA 36 A – EC, 350 – 1100 nm)

Tabulka A 4: Výsledky měření plamene metanu při výtokové rychlosti paliva $v_2 = 1,25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ s přidavkem dusíku

Měření	$\text{CH}_4\text{v}_2\text{q}_1$				$\text{CH}_4\text{v}_2\text{q}_1\text{MEC30N}_2$				$\text{CH}_4\text{v}_2\text{q}_1\text{MEC60N}_2$				$\text{CH}_4\text{v}_2\text{q}_1\text{MEC90N}_2$			
	Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2	
	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f
	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]
1	0,21543	16,04679	0,28816	16,04679	0,19880	15,99680	0,22802	15,99680	0,09575	15,89682	0,05037	15,89682	0,05883	15,54689	X	X
2	0,19673	16,09678	0,26563	16,09678	0,19781	15,99680	0,22130	15,99680	0,09748	15,89682	0,05188	15,89682	0,05381	15,54689	X	X
3	0,19595	16,04679	0,26290	16,04679	0,18440	15,99680	0,20943	15,99680	0,09891	15,89682	0,05084	15,89682	0,05980	15,49690	X	X
4	0,20251	16,09678	0,27000	16,09678	0,19630	15,99680	0,22080	15,99680	0,09853	15,89682	0,05003	15,89682	0,05823	15,49690	X	X
5	0,20800	16,09678	0,27997	16,09678	0,19220	15,99680	0,21542	15,99680	0,09474	15,89682	0,04911	15,89682	0,06036	15,44691	X	X
Průměr	0,20372	16,07678	0,27333	16,07678	0,19390	15,99680	0,21899	15,99680	0,09708	15,89682	0,05045	15,89682	0,05821	15,50690	X	X
Rozptyl	0,00005	0,00060	0,00009	0,00060	0,00003	0,00000	0,00004	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00140	X	X
Směrodatná odchylka	0,00729	0,02449	0,00942	0,02449	0,00526	0,00000	0,00623	0,00000	0,00160	0,00000	0,00091	0,00000	0,00232	0,03741	X	X

Legenda: X – oscilace nebyla naměřena, hodnotu nelze stanovit.

f – frekvence oscilace plamene

S(f) – amplituda signálu na frekvenci f

1, 2, 3, 4, 5 – pořadové číslo měření za daných podmínek

C1 – měřicí kanál C1 osciloskopu LeCroy (PDA 10 DT – EC, 1200 – 2570 nm)

C2 – měřicí kanál C2 osciloskopu LeCroy (PDA 36 A – EC, 350 – 1100 nm)

Tabulka A 5: Výsledky měření plamene metanu při výtokové rychlosti paliva $v_2 = 1,25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ s přidavkem oxidu uhličitého

Měření	$\text{CH}_4\text{v}_2\text{q}_1$				$\text{CH}_4\text{v}_2\text{q}_1\text{MEC30CO}_2$				$\text{CH}_4\text{v}_2\text{q}_1\text{MEC60CO}_2$				$\text{CH}_4\text{v}_2\text{q}_1\text{MEC90CO}_2$			
	Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2	
	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f
	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]
1	0,21543	16,04679	0,28816	16,04679	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2	0,19673	16,09678	0,26563	16,09678	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3	0,19595	16,04679	0,26290	16,04679	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
4	0,20251	16,09678	0,27000	16,09678	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5	0,20800	16,09678	0,27997	16,09678	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Průměr	0,20372	16,07678	0,27333	16,07678	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Rozptyl	0,00005	0,00060	0,00009	0,00060	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Směrodatná odchylka	0,00729	0,02449	0,00942	0,02449	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Legenda: X – oscilace nebyla naměřena, hodnotu nelze stanovit.

f – frekvence oscilace plamene

S(f) – amplituda signálu na frekvenci f

1, 2, 3, 4, 5 – pořadové číslo měření za daných podmínek

C1 – měřicí kanál C1 osciloskopu LeCroy (PDA 10 DT – EC, 1200 – 2570 nm)

C2 – měřicí kanál C2 osciloskopu LeCroy (PDA 36 A – EC, 350 – 1100 nm)

Tabulka A 6: Výsledky měření plamene metanu při výtokové rychlosti paliva $v_2 = 1,25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ s přidavkem Argonu

Měření	$\text{CH}_4 v_2 q_1$				$\text{CH}_4 v_2 q_1 \text{MEC30Ar}$				$\text{CH}_4 v_2 q_1 \text{MEC60Ar}$				$\text{CH}_4 v_2 q_1 \text{MEC90Ar}$			
	Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2	
	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f
	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]
1	0,21543	16,04679	0,28816	16,04679	0,22236	15,79684	0,22575	15,79684	0,09022	15,69686	0,03529	15,69686	0,06017	15,04699	X	X
2	0,19673	16,09678	0,26563	16,09678	0,23907	15,79684	0,24108	15,79684	0,09568	15,69686	0,03821	15,69686	0,06709	15,04699	X	X
3	0,19595	16,04679	0,26290	16,04679	0,23025	15,84683	0,23434	15,84683	0,09265	15,69686	0,03532	15,69686	0,06748	14,99700	X	X
4	0,20251	16,09678	0,27000	16,09678	0,22421	15,84683	0,22710	15,84683	0,09095	15,64687	0,03386	15,64687	0,06888	14,99700	X	X
5	0,20800	16,09678	0,27997	16,09678	0,23825	15,84683	0,24597	15,84683	0,09347	15,69686	0,03374	15,69686	0,06562	14,94701	X	X
Průměr	0,20372	16,07678	0,27333	16,07678	0,23083	15,82683	0,23485	15,82683	0,09260	15,68686	0,03529	15,68686	0,06585	15,00700	X	X
Rozptyl	0,00005	0,00060	0,00009	0,00060	0,00005	0,00060	0,00006	0,00060	0,00000	0,00040	0,00000	0,00040	0,00001	0,00140	X	X
Směrodatná odchylka	0,00729	0,02449	0,00942	0,02449	0,00691	0,02449	0,00782	0,02449	0,00193	0,02000	0,00161	0,02000	0,00302	0,03741	X	X

Legenda: X – oscilace nebyla naměřena, hodnotu nelze stanovit.

f – frekvence oscilace plamene

S(f) – amplituda signálu na frekvenci f

1, 2, 3, 4, 5 – pořadové číslo měření za daných podmínek

C1 – měřicí kanál C1 osciloskopu LeCroy (PDA 10 DT – EC, 1200 – 2570 nm)

C2 – měřicí kanál C2 osciloskopu LeCroy (PDA 36 A – EC, 350 – 1100 nm)

Tabulka A 7: Výsledky měření plamene metanu při výtokové rychlosti paliva $v_3 = 1,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ s přidavkem dusíku

Měření	CH ₄ v ₃ q ₁				CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30N ₂				CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60N ₂				CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90N ₂			
	Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2	
	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f
	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]
1	0,58527	15,49690	0,80678	15,49690	0,52421	15,44691	0,60101	15,44691	0,20789	15,39692	0,15384	15,39692	0,10882	14,99700	X	X
2	0,58646	15,49690	0,80922	15,49690	0,52940	15,44691	0,60690	15,44691	0,19102	15,34692	0,13867	15,34692	0,10263	14,99700	X	X
3	0,56450	15,49690	0,78096	15,49690	0,53038	15,44691	0,60576	15,44691	0,19205	15,34693	0,13747	15,34693	0,11102	14,94701	X	X
4	0,58559	15,49690	0,80646	15,49690	0,53073	15,44691	0,60501	15,44691	0,19602	15,34693	0,13911	15,34693	0,10771	14,89702	X	X
5	0,57439	15,49690	0,79365	15,49690	0,51773	15,44691	0,58847	15,44691	0,20289	15,34693	0,14142	15,34693	0,11039	14,89702	X	X
Průměr	0,57924	15,49690	0,79942	15,49690	0,52649	15,44691	0,60143	15,44691	0,19797	15,35693	0,14210	15,35693	0,10811	14,94701	X	X
Rozptyl	0,00007	0,00000	0,00011	0,00000	0,00002	0,00000	0,00005	0,00000	0,00004	0,00040	0,00004	0,00040	0,00001	0,00200	X	X
Směrodatná odchylka	0,00860	0,00000	0,01071	0,00000	0,00497	0,00000	0,00677	0,00000	0,00648	0,02000	0,00601	0,02000	0,00298	0,04471	X	X

Legenda: X – oscilace nebyla naměřena, hodnotu nelze stanovit.

f – frekvence oscilace plamene

S(f) – amplituda signálu na frekvenci f

1, 2, 3, 4, 5 – pořadové číslo měření za daných podmínek

C1 – měřicí kanál C1 osciloskopu LeCroy (PDA 10 DT – EC, 1200 – 2570 nm)

C2 – měřicí kanál C2 osciloskopu LeCroy (PDA 36 A – EC, 350 – 1100 nm)

Tabulka A 8: Výsledky měření plamene metanu při výtokové rychlosti paliva $v_3 = 1,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ s přidavkem oxidu uhličitého

Měření	$\text{CH}_4\text{v}_3\text{q}_1$				$\text{CH}_4\text{v}_3\text{q}_1\text{MEC30CO}_2$				$\text{CH}_4\text{v}_3\text{q}_1\text{MEC60CO}_2$				$\text{CH}_4\text{v}_3\text{q}_1\text{MEC90CO}_2$			
	Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2	
	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f
	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]
1	0,58527	15,49690	0,80678	15,49690	0,19337	15,29694	0,19355	15,29694	0,00926	15,19696	X	X	0,01523	14,14717	X	X
2	0,58646	15,49690	0,80922	15,49690	0,19076	15,29694	0,19446	15,29694	0,01793	15,19696	X	X	0,00854	14,19716	X	X
3	0,56450	15,49690	0,78096	15,49690	0,19171	15,29694	0,19627	15,29694	0,01214	15,29694	X	X	0,01002	14,04719	X	X
4	0,58559	15,49690	0,80646	15,49690	0,17422	15,29694	0,18065	15,29694	0,01148	15,19696	X	X	0,00575	14,09718	X	X
5	0,57439	15,49690	0,79365	15,49690	0,18718	15,29694	0,19240	15,29694	0,01671	15,19696	X	X	0,01096	14,04719	X	X
Průměr	0,57924	15,49690	0,79942	15,49690	0,18745	15,29694	0,19147	15,29694	0,01350	15,21696	X	X	0,01010	14,10718	X	X
Rozptyl	0,00007	0,00000	0,00011	0,00000	0,00005	0,00000	0,00003	0,00000	0,00001	0,00160	X	X	0,00001	0,00340	X	X
Směrodatná odchylka	0,00860	0,00000	0,01071	0,00000	0,00692	0,00000	0,00555	0,00000	0,00328	0,03999	X	X	0,00311	0,05830	X	X

Legenda: X – oscilace nebyla naměřena, hodnotu nelze stanovit.

f – frekvence oscilace plamene

S(f) – amplituda signálu na frekvenci f

1, 2, 3, 4, 5 – pořadové číslo měření za daných podmínek

C1 – měřicí kanál C1 osciloskopu LeCroy (PDA 10 DT – EC, 1200 – 2570 nm)

C2 – měřicí kanál C2 osciloskopu LeCroy (PDA 36 A – EC, 350 – 1100 nm)

Tabulka A 9: Výsledky měření plamene metanu při výtokové rychlosti paliva $v_3 = 1,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ s přidavkem argonu

Měření	$\text{CH}_4 v_3 q_1$				$\text{CH}_4 v_3 q_1 \text{ MEC30Ar}$				$\text{CH}_4 v_3 q_1 \text{ MEC60Ar}$				$\text{CH}_4 v_3 q_1 \text{ MEC90Ar}$			
	Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2	
	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f
	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]
1	0,58527	15,49690	0,80678	15,49690	0,65997	15,34693	0,67922	15,34693	0,21868	15,24695	0,10832	15,24695	0,15922	14,49710	X	X
2	0,58646	15,49690	0,80922	15,49690	0,66522	15,34693	0,68524	15,34693	0,20722	15,24695	0,10081	15,24695	0,17103	14,44711	X	X
3	0,56450	15,49690	0,78096	15,49690	0,66792	15,34693	0,69007	15,34693	0,20665	15,19696	0,09872	15,19696	0,17143	14,44711	X	X
4	0,58559	15,49690	0,80646	15,49690	0,68297	15,34693	0,70807	15,34693	0,20807	15,24695	0,10071	15,24695	0,17342	14,39712	X	X
5	0,57439	15,49690	0,79365	15,49690	0,67497	15,34693	0,70292	15,34693	0,19983	15,19696	0,09416	15,19696	0,16923	14,39712	X	X
Průměr	0,57924	15,49690	0,79942	15,49690	0,67021	15,34693	0,69311	15,34693	0,20809	15,22695	0,10054	15,22695	0,16887	14,43711	X	X
Rozptyl	0,00007	0,00000	0,00011	0,00000	0,00006	0,00000	0,00012	0,00000	0,00004	0,00060	0,00002	0,00060	0,00003	0,00140	X	X
Směrodatná odchylka	0,00860	0,00000	0,01071	0,00000	0,00800	0,00000	0,01081	0,00000	0,00605	0,02449	0,00457	0,02449	0,00500	0,03741	X	X

Legenda: X – oscilace nebyla naměřena, hodnotu nelze stanovit.

f – frekvence oscilace plamene

S(f) – amplituda signálu na frekvenci f

1, 2, 3, 4, 5 – pořadové číslo měření za daných podmínek

C1 – měřicí kanál C1 osciloskopu LeCroy (PDA 10 DT – EC, 1200 – 2570 nm)

C2 – měřicí kanál C2 osciloskopu LeCroy (PDA 36 A – EC, 350 – 1100 nm)

Tabulka A 10: Výsledky měření volně odhořívajícího plamene *n*-heptanu s přidavkem dusíku

	C ₇ H ₁₆ q ₁				C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30N ₂				C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60N ₂				C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90N ₂			
	Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2	
	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f
Měření	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]
1	0,43414	11,24775	0,50916	11,24775	0,32595	13,59728	0,30502	13,59728	0,22139	13,89722	0,21992	13,89722	0,08214	16,29674	0,06206	16,29674
2	0,39616	11,24775	0,46243	11,24775	0,32949	13,64727	0,30650	13,64727	0,22184	13,94721	0,22051	13,94721	0,07706	16,34673	0,05857	16,34673
3	0,40832	11,24775	0,49428	11,24775	0,32946	13,64727	0,30532	13,64727	0,20613	13,99720	0,20297	13,99720	0,07137	16,39672	0,05291	16,39672
4	0,37522	11,24775	0,45329	11,24775	0,33481	13,64727	0,30601	13,64727	0,22330	13,99720	0,21974	13,99720	0,06818	16,44671	0,04983	16,44671
5	0,40713	11,24775	0,48346	11,24775	0,30960	13,64727	0,28699	13,64727	0,19997	13,99720	0,19736	13,99720	0,06385	16,49670	0,04883	16,49670
Průměr	0,40420	11,24775	0,48053	11,24775	0,32586	13,63727	0,30197	13,63727	0,21453	13,96721	0,21210	13,96721	0,07252	16,39672	0,05444	16,39672
Rozptyl	0,00037	0,00000	0,00042	0,00000	0,00007	0,00040	0,00006	0,00040	0,00009	0,00160	0,00010	0,00160	0,00004	0,00500	0,00003	0,00500
Směrodatná odchylka	0,01911	0,00000	0,02043	0,00000	0,00861	0,02000	0,00751	0,02000	0,00959	0,03999	0,00991	0,03999	0,00645	0,07070	0,00510	0,07070

Legenda: X – oscilace nebyla naměřena, hodnotu nelze stanovit.

f – frekvence oscilace plamene

S(f) – amplituda signálu na frekvenci f

1, 2, 3, 4, 5 – pořadové číslo měření za daných podmínek

C1 – měřicí kanál C1 osciloskopu LeCroy (PDA 10 DT – EC, 1200 – 2570 nm)

C2 – měřicí kanál C2 osciloskopu LeCroy (PDA 36 A – EC, 350 – 1100 nm)

Tabulka A 11: Výsledky měření volně odhořívajícího plamene *n*-heptanu s přidavkem oxidu uhličitého

Měření	C ₇ H ₁₆ q ₁				C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30CO ₂				C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60CO ₂				C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90CO ₂			
	Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2	
	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f
	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]
1	0,43414	11,24775	0,50916	11,24775	0,24700	14,69706	0,20420	14,69706	0,16548	15,09698	0,12599	15,09698	0,04340	16,89662	0,03703	16,89662
2	0,39616	11,24775	0,46243	11,24775	0,23496	14,69706	0,19527	14,69706	0,16641	15,14697	0,12866	15,14697	0,03373	16,99660	0,03448	16,99660
3	0,40832	11,24775	0,49428	11,24775	0,24591	14,69706	0,20014	14,69706	0,16975	15,19696	0,13049	15,19696	0,03021	16,94661	0,03239	16,94661
4	0,37522	11,24775	0,45329	11,24775	0,23965	14,69706	0,19700	14,69706	0,15821	15,19696	0,12394	15,19696	0,03549	16,89662	0,03285	16,89662
5	0,40713	11,24775	0,48346	11,24775	0,23878	14,69706	0,19208	14,69706	0,16534	15,24695	0,13043	15,24695	0,03412	16,94661	0,03455	16,94661
Průměr	0,40420	11,24775	0,48053	11,24775	0,24126	14,69706	0,19774	14,69706	0,16504	15,17696	0,12790	15,17696	0,03539	16,93661	0,03426	16,93661
Rozptyl	0,00037	0,00000	0,00042	0,00000	0,00002	0,00000	0,00002	0,00000	0,00001	0,00260	0,00001	0,00260	0,00002	0,00140	0,00000	0,00140
Směrodatná odchylka	0,01911	0,00000	0,02043	0,00000	0,00454	0,00000	0,00415	0,00000	0,00377	0,05098	0,00257	0,05098	0,00437	0,03741	0,00163	0,03741

Legenda: X – oscilace nebyla naměřena, hodnotu nelze stanovit.

f – frekvence oscilace plamene

S(f) – amplituda signálu na frekvenci f

1, 2, 3, 4, 5 – pořadové číslo měření za daných podmínek

C1 – měřicí kanál C1 osciloskopu LeCroy (PDA 10 DT – EC, 1200 – 2570 nm)

C2 – měřicí kanál C2 osciloskopu LeCroy (PDA 36 A – EC, 350 – 1100 nm)

Tabulka A 12: Výsledky měření volně odhořívajícího plamene *n*-heptanu s přidavkem argonu

Měření	C ₇ H ₁₆ q ₁				C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30Ar				C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60Ar				C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90Ar			
	Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2		Měřicí kanál C1		Měřicí kanál C2	
	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f	S(f)	f
	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]	[a.u]	[Hz]
1	0,43414	11,24775	0,50916	11,24775	0,26980	14,24715	0,23602	14,24715	0,19269	14,34713	0,18099	14,34713	0,04776	16,49670	0,04090	16,49670
2	0,39616	11,24775	0,46243	11,24775	0,28768	14,24715	0,22368	14,24715	0,19566	14,39712	0,18196	14,39712	0,05245	16,59668	0,04337	16,59668
3	0,40832	11,24775	0,49428	11,24775	0,25765	14,24715	0,22329	14,24715	0,19944	14,44711	0,18669	14,44711	0,04780	16,59668	0,04094	16,59668
4	0,37522	11,24775	0,45329	11,24775	0,25938	14,19716	0,22305	14,19716	0,18348	14,44711	0,17125	14,44711	0,04752	16,64667	0,04122	16,64667
5	0,40713	11,24775	0,48346	11,24775	0,27388	14,19716	0,23165	14,19716	0,20294	14,49710	0,18900	14,49710	0,05102	16,69666	0,04281	16,69666
Průměr	0,40420	11,24775	0,48053	11,24775	0,26968	14,22715	0,22754	14,22715	0,19484	14,42711	0,18198	14,42711	0,04931	16,60668	0,04185	16,60668
Rozptyl	0,00037	0,00000	0,00042	0,00000	0,00012	0,00060	0,00003	0,00060	0,00004	0,00260	0,00004	0,00260	0,00000	0,00440	0,00000	0,00440
Směrodatná odchylka	0,01911	0,00000	0,02043	0,00000	0,01088	0,02449	0,00533	0,02449	0,00665	0,05098	0,00612	0,05098	0,00203	0,06632	0,00104	0,06632

Legenda: X – oscilace nebyla naměřena, hodnotu nelze stanovit.

f – frekvence oscilace plamene

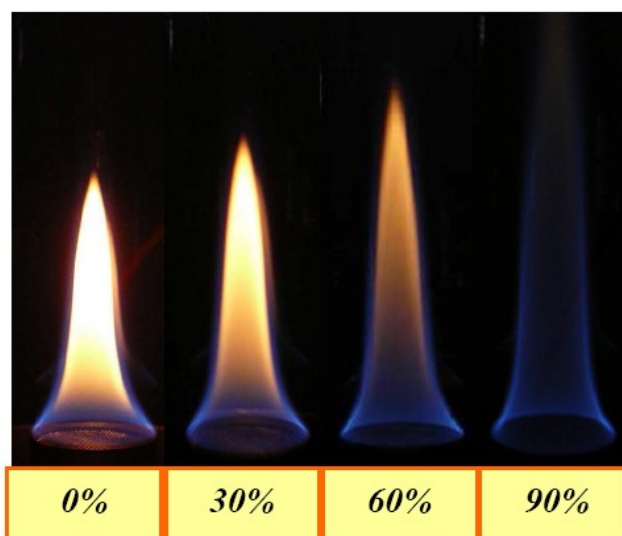
S(f) – amplituda signálu na frekvenci f

1, 2, 3, 4, 5 – pořadové číslo měření za daných podmínek

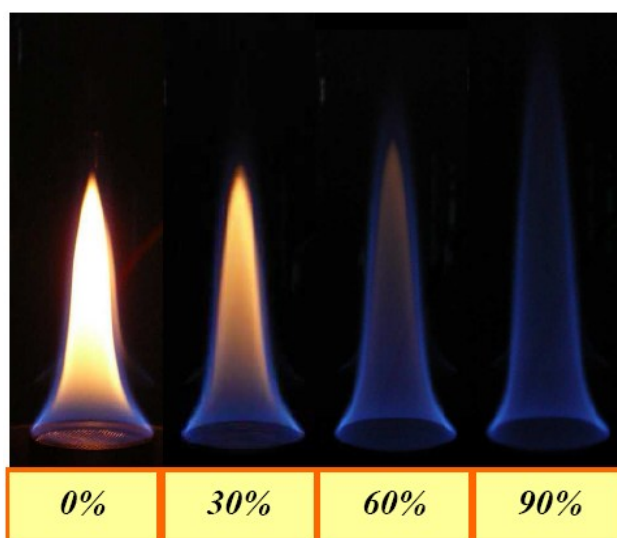
C1 – měřicí kanál C1 osciloskopu LeCroy (PDA 10 DT – EC, 1200 – 2570 nm)

C2 – měřicí kanál C2 osciloskopu LeCroy (PDA 36 A – EC, 350 – 1100 nm)

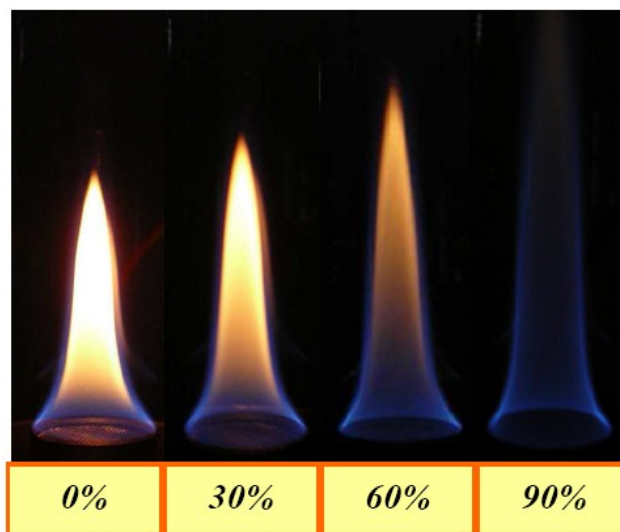
11 Příloha B: Sekvence snímků plamene pohárkového hořáku



Obrázek B 1: Sekvence snímků plamene metanu při $v_f=1\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $q_f=40\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace N_2



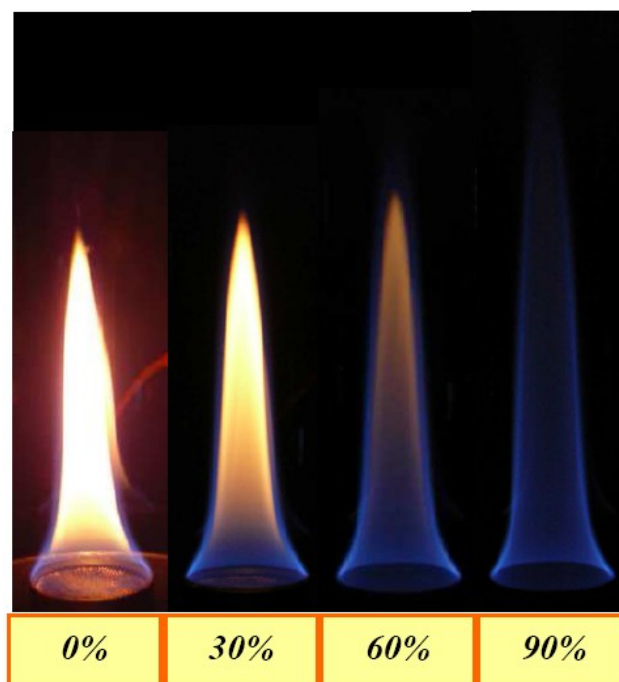
Obrázek B 2: Sekvence snímků plamene metanu při $v_f=1\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $q_f=40\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace CO_2



Obrázek B 3: *Sekvence snímků plamene metanu při $v_1=1\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $q_1=40\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace Ar*



Obrázek B 4: *Sekvence snímků plamene metanu při $v_2=1,25\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $q_1=40\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace N_2*



Obrázek B 5: Sekvence snímků plamene metanu při $v_2=1,25 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $q_1=40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace CO_2



Obrázek B 6: Sekvence snímků plamene metanu při $v_2=1,25 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $q_1=40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace Ar



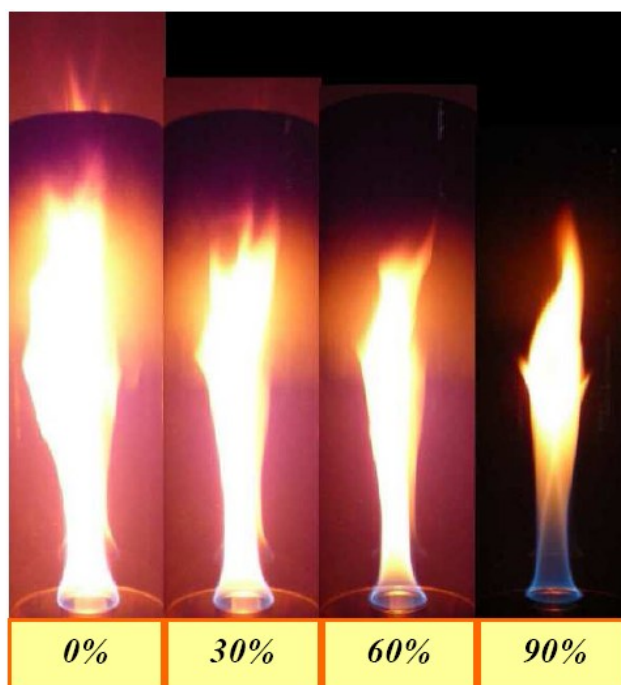
Obrázek B 7: Sekvence snímků plamene metanu při $v_3=1,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $q_1=40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace N_2



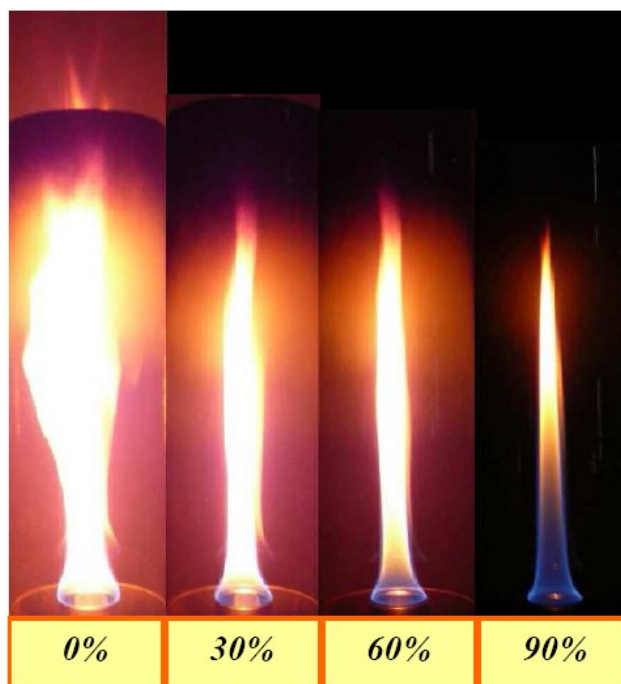
Obrázek B 8: Sekvence snímků plamene metanu při $v_3=1,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $q_1=40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace CO_2



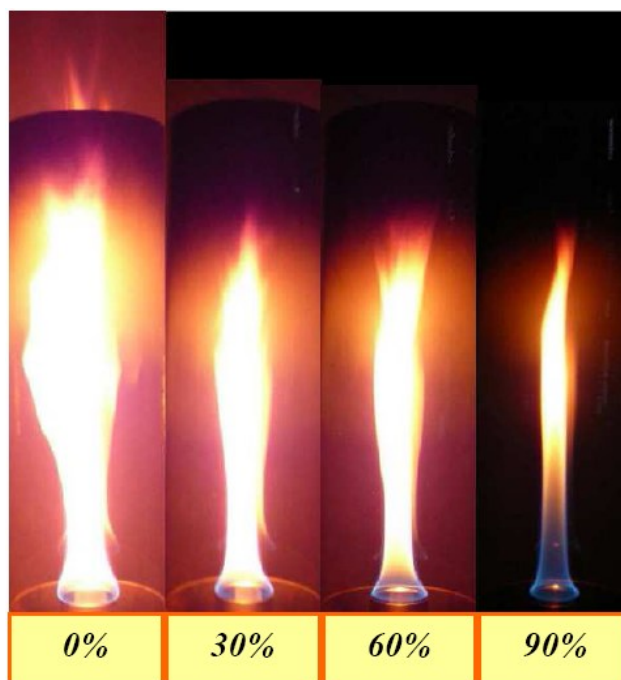
Obrázek B 9: Sekvence snímků plamene metanu při $v_3=1,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $q_1=40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace Ar



Obrázek B 10: Sekvence snímků plamene n – heptanu při $q_1=40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace N_2

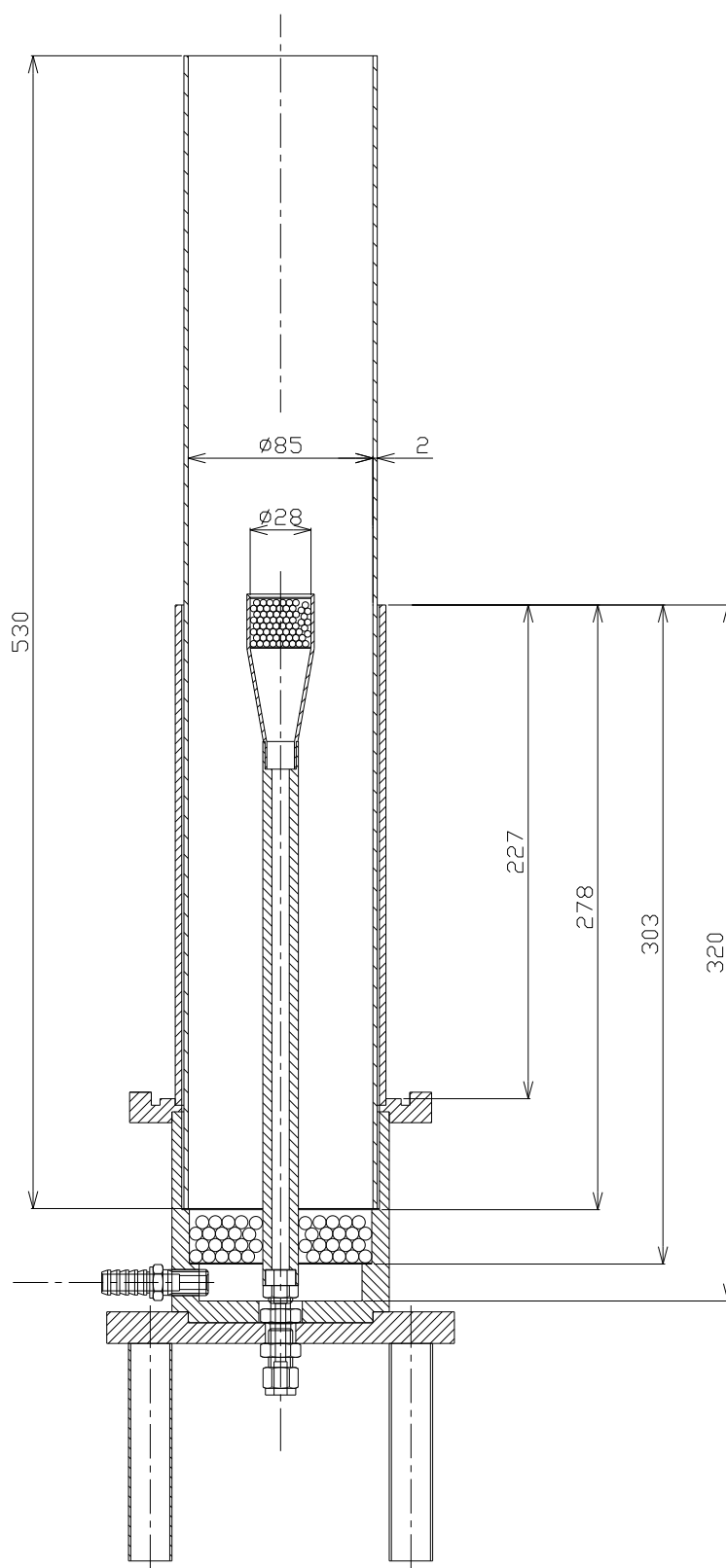


Obrázek B 11: Sekvence snímků plamene n – heptanu při $q_l=40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace CO_2



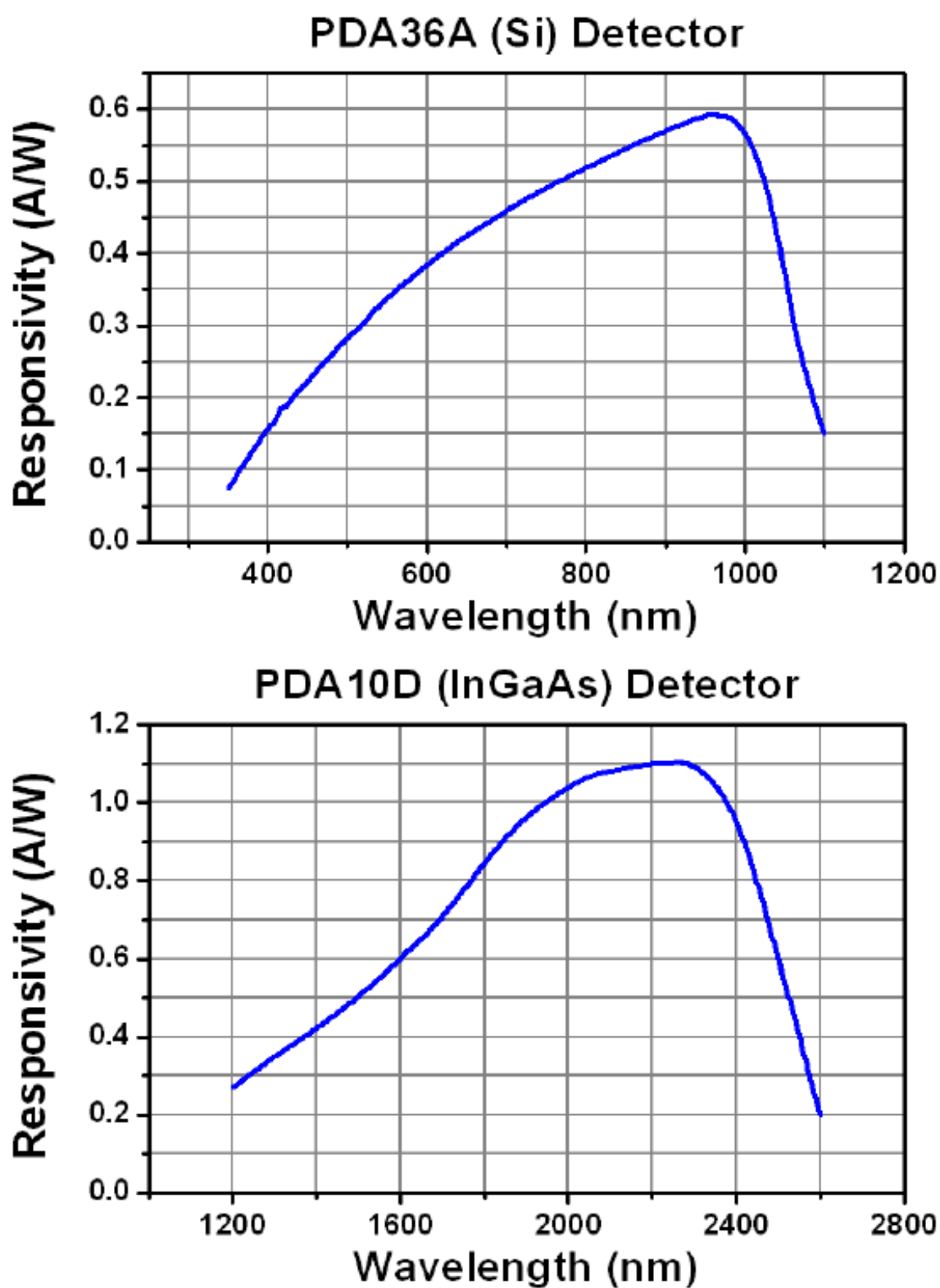
Obrázek B 12: Sekvence snímků plamene n – heptanu při $q_l=40 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ při různých koncentracích MEC hodnoty hasící koncentrace Ar

12 Příloha C: Sestava pohárkového hořáku



Obrázek C 1: Sestava modifikovaného pohárkového hořáku

13 Příloha D: Křivky spektrální citlivosti fotodetektorů



Obrázek D 1: Křivky spektrální citlivosti fotodetektorů

14 Příloha E: Tabulky průběhů měření

Tabulka E 1: Podmínky měření metanu s výtokovou rychlostí paliva $v_l = 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (část 1)

Vzorek	Stopa č. LeCroy WS42Xs	Čas (Iniciace:11:33)	Palivo *1	Průtok paliva [ml/min] *1	Rychlost paliva [cm/s]	Nastavená hodnota [ml/min] *1ekv AIR	Obtok *100 & *25	Průtok v obtoku [l/min] *100 & *25	Nastavená hodnota [l/min] *100 & *25 ekv N ₂	Fotodetektor 1 nastavení InGaAs@C1	Fotodetektor 2 nastavení Si@C2	Zaznam LeCroyWS42Xs C1@C2
01-CH ₄ v ₁ q ₁	_00000	12:33:37	CH ₄	369,5	1	475	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₁ q ₁	_00001	12:34:11	CH ₄	369,5	1	475	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₁ q ₁	_00002	12:34:41	CH ₄	369,5	1	475	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₁ q ₁	_00003	12:35:10	CH ₄	369,5	1	475	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₁ q ₁	_00004	12:35:40	CH ₄	369,5	1	475	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30N ₂	_00005	12:39:30	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30N ₂	_00006	12:40:03	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30N ₂	_00007	12:40:32	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30N ₂	_00008	12:41:03	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30N ₂	_00009	12:41:34	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60N ₂	_00010	12:43:40	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60N ₂	_00011	12:44:10	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60N ₂	_00012	12:44:39	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60N ₂	_00013	12:45:09	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60N ₂	_00014	12:45:38	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90N ₂	_00015	12:47:54	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90N ₂	_00016	12:48:24	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90N ₂	_00017	12:48:52	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90N ₂	_00018	12:49:22	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90N ₂	_00019	12:49:52	CH ₄	369,5	1	475	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz

Tabulka E 2: Podmínky měření metanu s výtokovou rychlostí paliva $v_1 = 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (část 2)

Vzorek	Stopa č. LeCroy WS42Xs	Čas (Iniciace:11:33)	Palivo *1	Průtok paliva [ml/min] *1	Rychlost paliva [cm/s]	Nastavená hodnota [ml/min] *1ekv AIR	Obtok *100 & *25	Průtok v obtoku [l/min] *100 & *25	Nastavená hodnota [l/min] *100 & *25 ekv N ₂	Fotodetektor 1 nastavení InGaAs@C1	Fotodetektor 2 nastavení Si@C2	Zaznam LeCroyWS42Xs C1@C2
01-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30CO ₂	_00020	12:53:45	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30CO ₂	_00021	12:54:14	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30CO ₂	_00022	12:54:44	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30CO ₂	_00023	12:55:12	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30CO ₂	_00024	12:55:42	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60CO ₂	_00025	12:57:37	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60CO ₂	_00026	12:58:09	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60CO ₂	_00027	12:58:38	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60CO ₂	_00028	12:59:05	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60CO ₂	_00029	12:59:35	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90CO ₂	_00030	13:01:37	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90CO ₂	_00031	13:02:06	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90CO ₂	_00032	13:02:34	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90CO ₂	_00033	13:03:02	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90CO ₂	_00034	13:03:31	CH ₄	369,5	1	475	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30Ar	_00035	13:07:36	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30Ar	_00036	13:08:07	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30Ar	_00037	13:08:36	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30Ar	_00038	13:09:07	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC30Ar	_00039	13:09:37	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60Ar	_00040	13:11:37	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60Ar	_00041	13:12:05	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60Ar	_00042	13:12:33	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60Ar	_00043	13:13:01	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC60Ar	_00044	13:13:30	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90Ar	_00045	13:15:32	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90Ar	_00046	13:16:03	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90Ar	_00047	13:16:33	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90Ar	_00048	13:17:04	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₁ q ₁ MEC90Ar	_00049	13:17:38	CH ₄	369,5	1	475	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz

Legenda: *1 = F-201CV-1K0-ABD-33-V, *25 = F-202EV-ABD-33-K, *100 = F-202AV-M10-ABD-44-V,
InGaAs = PDA10DT-EC Si = PDA36A-EC C1 = měřicí kanál C1 LeCroy WS42Xs C2 = měřicí kanál C2 LeCroy WS42Xs
Nastavená hodnota = hodnota nastavena na řídicí jednotce Tlak: 101,98 kPa Teplota: 22,4 °C Relativní vlhkost: 26,6 %

Tabulka E 3: Podmínky měření metanu s výtokovou rychlostí $v_2 = 1,25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (část 1)

Vzorek	Stopa č. LeCroy WS42Xs	Čas (Iniciace:14:09)	Palivo *1	Průtok paliva [ml/min] *1	Rychlost paliva [cm/s]	Nastavená hodnota [ml/min] *1ekv AIR	Obtok *100 & *25	Průtok v obtoku [l/min] *100 & *25	Nastavená hodnota [l/min] *100 & *25 ekv N ₂	Fotodetektor 1 nastavení InGaAs@C1	Fotodetektor 2 nastavení Si@C2	Zaznam LeCroyWS42Xs C1@C2
01-CH ₄ v ₂ q ₁	_00050	15:09:13	CH ₄	461,8	1,25	593	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₂ q ₁	_00051	15:09:44	CH ₄	461,8	1,25	593	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₂ q ₁	_00052	15:10:17	CH ₄	461,8	1,25	593	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₂ q ₁	_00053	15:10:50	CH ₄	461,8	1,25	593	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₂ q ₁	_00054	15:11:21	CH ₄	461,8	1,25	593	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30N ₂	_00055	15:14:22	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30N ₂	_00056	15:14:52	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30N ₂	_00057	15:15:22	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30N ₂	_00058	15:15:52	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30N ₂	_00059	15:16:25	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60N ₂	_00060	15:18:38	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60N ₂	_00061	15:19:11	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60N ₂	_00062	15:19:41	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60N ₂	_00063	15:20:13	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60N ₂	_00064	15:20:44	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90N ₂	_00065	15:23:15	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90N ₂	_00066	15:23:44	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90N ₂	_00067	15:24:14	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90N ₂	_00068	15:24:43	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90N ₂	_00069	15:25:17	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz

Tabulka E 4: Podmínky měření metanu s výtokovou rychlostí $v_2 = 1,25 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (část 2)

Vzorek	Stopa č. LeCroy WS42Xs	Čas (Iniciace:14:09)	Palivo *1	Průtok paliva [ml/min] *1	Rychlost paliva [cm/s]	Nastavená hodnota [ml/min] *1ekv AIR	Obtok *100 & *25	Průtok v obtoku [l/min] *100 & *25	Nastavená hodnota [l/min] *100 & *25 ekv N ₂	Fotodetektor 1 nastavení InGaAs@C1	Fotodetektor 2 nastavení Si@C2	Zaznam LeCroyWS42Xs C1@C2
01-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30CO ₂	_00070	15:28:46	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30CO ₂	_00071	15:29:17	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30CO ₂	_00072	15:29:46	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30CO ₂	_00073	15:30:16	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30CO ₂	_00074	15:30:45	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60CO ₂	_00075	15:33:14	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60CO ₂	_00076	15:33:44	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60CO ₂	_00077	15:34:12	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60CO ₂	_00078	15:34:43	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60CO ₂	_00079	15:35:13	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90CO ₂	_00080	15:37:29	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90CO ₂	_00081	15:38:01	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90CO ₂	_00082	15:38:35	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90CO ₂	_00083	15:39:05	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90CO ₂	_00084	15:39:36	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30Ar	_00085	15:43:02	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30Ar	_00086	15:43:34	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30Ar	_00087	15:44:05	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30Ar	_00088	15:44:35	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC30Ar	_00089	15:45:04	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60Ar	_00090	15:47:04	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60Ar	_00091	15:47:34	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60Ar	_00092	15:48:05	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60Ar	_00093	15:48:36	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC60Ar	_00094	15:49:06	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90Ar	_00095	15:51:35	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90Ar	_00096	15:52:06	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90Ar	_00097	15:52:37	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90Ar	_00098	15:53:07	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₂ q ₁ MEC90Ar	_00099	15:53:36	CH ₄	461,8	1,25	593	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz

Legenda: *1 = F-201CV-1K0-ABD-33-V , *25 = F-202EV-ABD-33-K, *100 = F-202AV-M10-ABD-44-V,
InGaAs = PDA10DT-EC Si = PDA36A-EC C1 = měřicí kanál C1 LeCroy WS42Xs C2 = měřicí kanál C2 LeCroy WS42Xs
Nastavená hodnota = hodnota nastavena na řídicí jednotce Tlak: 102,19 kPa Teplota: 22,6 °C Relativní vlhkost: 25,6 %

Tabulka E 5: Podmínky měření metanu s výtokovou rychlostí $v_3 = 1,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ (část 1)

Vzorek	Stopa č. LeCroy WS42Xs	Čas (Iniciace:17:09)	Palivo *1	Průtok paliva [ml/min] *1	Rychlost paliva [cm/s]	Nastavená hodnota [ml/min] *1ekv AIR	Obtok *100 & *25	Průtok v obtoku [l/min] *100 & *25	Nastavená hodnota [l/min] *100 & *25 ekv N ₂	Fotodetektor 1 nastavení InGaAs@C1	Fotodetektor 2 nastavení Si@C2	Zaznam LeCroyWS42Xs C1@C2	
01-CH ₄ v ₃ q ₁	_00100	18:09:14	CH ₄	554,2	1,5	712	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-CH ₄ v ₃ q ₁	_00101	18:09:44	CH ₄	554,2	1,5	712	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-CH ₄ v ₃ q ₁	_00102	18:10:18	CH ₄	554,2	1,5	712	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-CH ₄ v ₃ q ₁	_00103	18:10:50	CH ₄	554,2	1,5	712	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-CH ₄ v ₃ q ₁	_00104	18:11:22	CH ₄	554,2	1,5	712	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
01-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30N ₂	_00105	18:14:22	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30N ₂	_00106	18:14:52	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30N ₂	_00107	18:15:23	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30N ₂	_00108	18:15:52	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30N ₂	_00109	18:16:27	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	36,9+3,11	36,9 + 3,11	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
01-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60N ₂	_00110	18:18:39	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60N ₂	_00111	18:19:12	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60N ₂	_00112	18:19:42	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60N ₂	_00113	18:20:14	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60N ₂	_00114	18:20:45	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	33,8+6,22	33,8 + 6,22	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
01-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90N ₂	_00115	18:23:14	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90N ₂	_00116	18:23:43	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90N ₂	_00117	18:24:13	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90N ₂	_00118	18:24:42	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90N ₂	_00119	18:25:16	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+N ₂	30,7+9,33	30,7 + 9,33	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz

Tabulka E 6: Podmínky měření metanu s výtokovou rychlostí $v_3 = 1,5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (část 2)

Vzorek	Stopa č. LeCroy WS42Xs	Čas (Iniciace:17:09)	Palivo *1	Průtok paliva [ml/min] *1	Rychlost paliva [cm/s]	Nastavená hodnota [ml/min] *1ekv AIR	Obtok *100 & *25	Průtok v obtoku [l/min] *100 & *25	Nastavená hodnota [l/min] *100 & *25 ekv N ₂	Fotodetektor 1 nastavení InGaAs@C1	Fotodetektor 2 nastavení Si@C2	Zaznam LeCroyWS42Xs C1@C2
01-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30CO ₂	_00120	18:28:48	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30CO ₂	_00121	18:29:19	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30CO ₂	_00122	18:29:48	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30CO ₂	_00123	18:30:18	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30CO ₂	_00124	18:30:47	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	38,1 + 1,88	38,1 + 2,54	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60CO ₂	_00125	18:33:16	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60CO ₂	_00126	18:33:46	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60CO ₂	_00127	18:34:14	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60CO ₂	_00128	18:34:45	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60CO ₂	_00129	18:35:15	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	36,2 + 3,77	36,2 + 5,06	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90CO ₂	_00130	18:37:30	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90CO ₂	_00131	18:38:00	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90CO ₂	_00132	18:38:34	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90CO ₂	_00133	18:39:04	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90CO ₂	_00134	18:39:35	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+CO ₂	34,4 + 5,65	34,4 + 7,57	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30Ar	_00135	18:43:07	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30Ar	_00136	18:43:39	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30Ar	_00137	18:44:09	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30Ar	_00138	18:44:40	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC30Ar	_00139	18:45:09	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	35,5 + 4,48	35,5 + 3,19	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60Ar	_00140	18:47:04	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60Ar	_00141	18:47:34	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60Ar	_00142	18:48:05	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60Ar	_00143	18:48:36	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC60Ar	_00144	18:49:06	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	31 + 8,95	31 + 6,34	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
01-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90Ar	_00145	18:51:33	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
02-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90Ar	_00146	18:52:04	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
03-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90Ar	_00147	18:52:35	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
04-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90Ar	_00148	18:53:05	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz
05-CH ₄ v ₃ q ₁ MEC90Ar	_00149	18:53:34	CH ₄	554,2	1,5	712	Air+Ar	26,6 + 13,43	26,6 + 9,47	40dB_5kHz	40dB	20s 500Hz

Legenda: *1 = F-201CV-1K0-ABD-33-V *25 = F-202EV-ABD-33-K *100 = F-202AV-M10-ABD-44-V
InGaAs = PDA10DT-EC Si = PDA36A-EC C1 = měřicí kanál C1 LeCroy WS42Xs C2 = měřicí kanál C2 LeCroy WS42Xs
Nastavená hodnota = hodnota nastavena na řídicí jednotce Tlak: 102,18 kPa Teplota: 22,7 °C Relativní vlhkost: 25,4 %

Tabulka E 7: Podmínky měření volně odhořívajícího n-heptanu (část 1)

Vzorek	Stopa č. LeCroy WS42Xs	Čas (Iniciace:21:20)	Palivo *1	Obtok *100 & *25	Průtok v obtoku [l/min] *100 & *25	Nastavená hodnota [l/min] *100 & *25 ekv N ₂	Fotodetektor 1 nastavení InGaAs@C1	Fotodetektor 2 nastavení Si@C2	Zaznam LeCroyWS42Xs C1@C2	
01-C ₇ H ₁₆ q ₁	_00150	22:20:25	C ₇ H ₁₆	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-C ₇ H ₁₆ q ₁	_00151	22:21:05	C ₇ H ₁₆	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-C ₇ H ₁₆ q ₁	_00152	22:21:36	C ₇ H ₁₆	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-C ₇ H ₁₆ q ₁	_00153	22:22:07	C ₇ H ₁₆	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-C ₇ H ₁₆ q ₁	_00154	22:22:35	C ₇ H ₁₆	Air	40+0	40 + 0	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
01-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30N ₂	_00155	22:27:01	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	36,2+3,83	36,2+3,83	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30N ₂	_00156	22:27:37	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	36,2+3,83	36,2+3,83	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30N ₂	_00157	22:28:04	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	36,2+3,83	36,2+3,83	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30N ₂	_00158	22:28:32	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	36,2+3,83	36,2+3,83	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30N ₂	_00159	22:29:01	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	36,2+3,83	36,2+3,83	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
01-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60N ₂	_00160	22:31:58	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	32,3+7,66	32,3+7,66	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60N ₂	_00161	22:32:31	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	32,3+7,66	32,3+7,66	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60N ₂	_00162	22:33:01	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	32,3+7,66	32,3+7,66	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60N ₂	_00163	22:33:31	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	32,3+7,66	32,3+7,66	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60N ₂	_00164	22:33:59	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	32,3+7,66	32,3+7,66	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
01-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90N ₂	_00165	22:36:00	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	28,5+11,49	28,5+11,49	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90N ₂	_00166	22:36:30	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	28,5+11,49	28,5+11,49	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90N ₂	_00167	22:37:00	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	28,5+11,49	28,5+11,49	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90N ₂	_00168	22:37:28	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	28,5+11,49	28,5+11,49	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90N ₂	_00169	22:37:58	C ₇ H ₁₆	Air+N ₂	28,5+11,49	28,5+11,49	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
01-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30CO ₂	_00170	22:40:53	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	37,5 + 2,51	37,5 + 3,38	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30CO ₂	_00171	22:41:24	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	37,5 + 2,51	37,5 + 3,38	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30CO ₂	_00172	22:41:52	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	37,5 + 2,51	37,5 + 3,38	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30CO ₂	_00173	22:42:20	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	37,5 + 2,51	37,5 + 3,38	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30CO ₂	_00174	22:42:51	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	37,5 + 2,51	37,5 + 3,38	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz

Tabulka E 8: Podmínky měření volně odhořívajícího n-heptanu (část 2)

Vzorek	Stopa č. LeCroy WS42Xs	Čas (Iniciace:21:20)	Palivo *1	Obtok *100 & *25	Průtok v obtoku [l/min] *100 & *25	Nastavená hodnota [l/min] *100 & *25 ekv N ₂	Fotodetektor 1 nastavení InGaAs@C1	Fotodetektor 2 nastavení Si@C2	Zaznam LeCroyWS42Xs C1@C2	
01-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60CO ₂	_00175	22:44:55	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	35 + 5,02	35 + 6,73	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60CO ₂	_00176	22:45:26	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	35 + 5,02	35 + 6,73	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60CO ₂	_00177	22:45:56	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	35 + 5,02	35 + 6,73	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60CO ₂	_00178	22:46:25	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	35 + 5,02	35 + 6,73	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60CO ₂	_00179	22:46:55	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	35 + 5,02	35 + 6,73	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
01-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90CO ₂	_00180	22:48:24	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	32,5 + 7,53	32,5 + 10,04	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90CO ₂	_00181	22:48:55	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	32,5 + 7,53	32,5 + 10,04	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90CO ₂	_00182	22:49:28	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	32,5 + 7,53	32,5 + 10,04	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90CO ₂	_00183	22:50:01	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	32,5 + 7,53	32,5 + 10,04	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90CO ₂	_00184	22:50:37	C ₇ H ₁₆	Air+CO ₂	32,5 + 7,53	32,5 + 10,04	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
01-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30Ar	_00185	22:52:18	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	34,9 + 5,1	34,9 + 3,63	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30Ar	_00186	22:52:43	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	34,9 + 5,1	34,9 + 3,63	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30Ar	_00187	22:53:14	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	34,9 + 5,1	34,9 + 3,63	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30Ar	_00188	22:53:42	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	34,9 + 5,1	34,9 + 3,63	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC30Ar	_00189	22:54:13	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	34,9 + 5,1	34,9 + 3,63	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
01-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60Ar	_00190	22:56:24	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	29,8 + 10,2	29,8 + 7,22	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60Ar	_00191	22:56:55	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	29,8 + 10,2	29,8 + 7,22	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60Ar	_00192	22:57:27	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	29,8 + 10,2	29,8 + 7,22	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60Ar	_00193	22:57:56	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	29,8 + 10,2	29,8 + 7,22	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC60Ar	_00194	22:58:24	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	29,8 + 10,2	29,8 + 7,22	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
01-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90Ar	_00195	23:00:55	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	24,7 + 15,3	24,7 + 10,78	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
02-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90Ar	_00196	23:01:26	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	24,7 + 15,3	24,7 + 10,78	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
03-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90Ar	_00197	23:01:56	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	24,7 + 15,3	24,7 + 10,78	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
04-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90Ar	_00198	23:02:25	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	24,7 + 15,3	24,7 + 10,78	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz
05-C ₇ H ₁₆ q ₁ MEC90Ar	_00199	23:02:55	C ₇ H ₁₆	Air+Ar	24,7 + 15,3	24,7 + 10,78	40dB_5kHz	40dB	20s	500Hz

Legenda: *1 = F-201CV-1K0-ABD-33-V

*25 = F-202EV-ABD-33-K

*100 = F-202AV-M10-ABD-44-V

InGaAs = PDA10DT-EC Si = PDA36A-EC C1 = měřicí kanál C1 LeCroy WS42Xs C2 = měřicí kanál C2 LeCroy WS42Xs

Nastavená hodnota = hodnota nastavena na řídicí jednotce Tlak: 101,88 kPa Teplota: 21,75 °C Relativní vlhkost: 26,1 %